



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# 시간지연을 갖는 시스템의 PSO 기반 PID 제어기 설계

Design of PSO-based PID Controller for Time Delay Systems



2015년 2월

한국해양대학교 대학원

기관공학과 정진기

본 논문을 정진기의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장

오 세 준

위 원

오 진 석

위 원

소 명 옥



2014년 12월 16일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

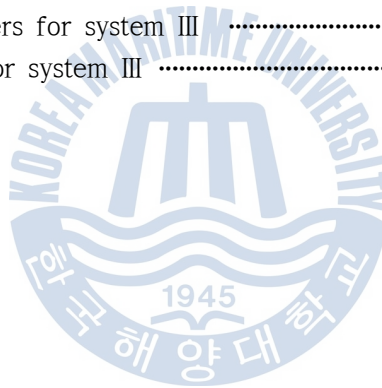
List of Tables .....	iv
List of Figures .....	v
Abstract .....	vi
<b>제 1 장 서론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구 배경 및 동향 .....	1
1.2 연구 내용과 구성 .....	2
<b>제 2 장 PSO 알고리즘</b> .....	<b>3</b>
2.1 PSO 알고리즘의 특징 .....	3
2.2 PSO 알고리즘의 구조 .....	4
2.2.1 개체 및 집단 .....	4
2.2.2 $P_{best}$ 및 $G_{best}$ .....	5
2.2.3 초기집단의 생성 및 적합도 평가 .....	5
2.2.4 속도 업데이트 .....	5
2.2.5 위치 업데이트 .....	8
2.2.6 종료 조건 .....	9
2.2.7 PSO 알고리즘의 학습과정 .....	10
<b>제 3 장 PSO-PID 제어기 설계</b> .....	<b>12</b>
3.1 PID 제어 .....	12
3.2 PID 제어기 동조규칙 .....	18
3.2.1 Ziegler-Nichols 동조법 .....	18
3.2.2 Cohen-Coon 동조법 .....	21
3.2.3 IMC 동조법 .....	23
3.2.4 Lopez ITAE 동조법 .....	23
3.3 PSO-PID 제어기 설계 .....	24
3.3.1 PSO 기반 PID 제어기 .....	24
3.3.2 PSO 기반 PID 제어기 동조 과정 .....	25

제 4 장 모의 실험 및 검토 .....	27
4.1 시스템 I .....	27
4.2 시스템 II .....	30
4.3 시스템 III .....	34
제 5 장 결 론 .....	39
참고문헌 .....	40



## List of Tables

<b>Table 3.1</b>	The effect of parameter change for closed loop system .....	17
<b>Table 3.2</b>	PID tuning rules by the open-loop method .....	19
<b>Table 3.3</b>	PID tuning rules by the closed-loop method .....	21
<b>Table 3.4</b>	PID tuning rules by the Cohen-Coon method .....	22
<b>Table 3.5</b>	PID tuning rules by the IMC method .....	23
<b>Table 3.6</b>	PID tuning rules by the Lopez ITAE method .....	24
<b>Table 4.1</b>	Tuned parameters for system I .....	28
<b>Table 4.2</b>	Performances for system I .....	30
<b>Table 4.3</b>	Tuned parameters for system II .....	32
<b>Table 4.4</b>	Performances for system II .....	34
<b>Table 4.5</b>	Tuned parameters for system III .....	36
<b>Table 4.6</b>	Performances for system III .....	38



## List of Figures

Fig. 2.1 Change of inertia weights for LDIW, SAIW, CSIW and FIW .....	8
Fig. 2.2 Update concept of particle velocity & position .....	9
Fig. 2.3 Flowchart of PSO algorithm .....	11
Fig. 3.1 The Proportional band .....	13
Fig. 3.2 Integral control action .....	14
Fig. 3.3 Derivative control action .....	16
Fig. 3.4 Proportional-Integral-Derivative control action .....	17
Fig. 3.5 Block diagram of PID control system .....	17
Fig. 3.6 Response curve for the unit step input .....	19
Fig. 3.7 Closed-loop control system with proportional gain .....	20
Fig. 3.8 Response curve and ultimate period .....	20
Fig. 3.9 Response curve for the unit step input .....	22
Fig. 3.10 PSO-PID control system .....	25
Fig. 4.1 Fitness and PID parameters based on PSO for system I .....	28
Fig. 4.2 Comparison of set-point tracking responses for system I .....	29
Fig. 4.3 Verification of FOPTD estimation model for system II .....	31
Fig. 4.4 Fitness and PID parameters based on PSO for system II .....	32
Fig. 4.5 Comparison of set-point tracking responses for system II .....	33
Fig. 4.6 Verification of FOPTD estimation model for system III .....	35
Fig. 4.7 Fitness and PID parameters based on PSO for system III .....	36
Fig. 4.8 Comparison of set-point tracking responses for system III .....	37

# Design of PSO-based PID Controller for Time Delay Systems

Jin-Gi Jeong

Division of Marine Engineering,  
Graduate school of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

In recent years, with the development of digital computers/semiconductor devices and the establishment of various control theories, control technology has grown remarkably. However, for controllers on the industrial sites, economic feasibility, performance, reliability, and easiness of maintenance need to be essentially considered, and thus, PID controllers, which are based on a classical control technique, are still widely used, accounting for more than about 90%.

A PID controller basically has a simple structure that consists of three parameters, and has relatively superior control characteristics even in a nonlinear system and a system where an accurate mathematical model cannot be obtained. Also, an engineer on the sites can easily tune controller parameters, and the establishment and maintenance of a system are convenient. However, the performance of a PID controller, which is widely used on general industrial sites, varies significantly depending on the degree of optimization of parameter tuning. On the sites, the parameters of a controller are mostly tuned based on the experience of an engineer, rather than an analytical method for a system, and it is inevitably vulnerable to the changes and uncertainties of a system.

In this situation, the development of a PID controller parameter tuning technique that has superior performance and can be applied to various types of systems is required, rather than a controller design based on the experience of individuals.



A number of tuning rules have been suggested until recently, and the most representative PID tuning method is the Ziegler-Nichols tuning method, which is widely used on the sites. Also, there are the Cohen-Coon method, the IMC method, and the Lopez ITAE method, which tune parameters by simplifying a high-order system into a First-Order Plus Time Delay (FOPTD) system with a time delay. Recently, controller design methods that introduce behavioral patterns found in the natural world into an optimization technique have been studied. The representative method includes a Genetic Algorithm (GA), which has been implemented using natural selection and evolutionary mechanism. Also, a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, which has recently been suggested, simulates social behavior patterns found in the communities of insects, birds, and fish. This introduces a concept, where a number of individuals find an optimal solution in a search area based on the information on each individual and the entire community, into an optimization search algorithm. Despite the relative simplicity of the algorithm, many studies have been performed based on its superior control performance.

In this study, a PSO-based PID controller that optimally tunes the parameters of a controller using a PSO algorithm that is based on the social behavior patterns of organisms was proposed. To appropriately tune the three kinds of gains of the proposed PID controller (proportional gain, integral gain, and derivative gain), IAE was used as the objective function so that the sum of the absolute values of errors, which are the difference between the input and the output, could be minimized. Also, to strengthen the global search of particles in the early stage of search and to strengthen the local search in the convergence stage, the inertial load was linearly decreased as the generation number increased.

To examine the validity of the proposed tuning method, simulations were performed by applying the proposed method to three kinds of systems (first-order, second-order, and fifth-order systems with a time delay); and the superiority of the proposed PSO-based PID controller was demonstrated by comparing its response characteristics with those of the Z-N tuning method, the Cohen-Coon method, the IMC method, and the Lopez ITAE method, which have frequently been used.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 동향

오늘날 디지털 컴퓨터 및 반도체 소자의 발달과 다양한 제어이론의 확립에 힘입어 제어기술은 현저한 성장이 이루어졌다. 하지만 산업 현장의 제어기는 경제성, 성능, 신뢰성 및 정비 용이성 등의 사항이 필수적으로 고려되어야 하므로 여전히 고전적 제어 기법에 기반을 둔 PID 제어가 약 90%이상을 차지할 정도로 많이 사용되고 있다[1].

기본적으로 PID 제어기는 세 개의 파라미터로 구성된 간단한 구조일 뿐만 아니라 비선형 시스템 및 정확한 수학적 모델을 얻기 어려운 시스템에서도 상대적으로 제어 특성이 우수하다. 그리고 현장의 엔지니어가 제어기 파라미터 선정과 조정을 비교적 손쉽게 할 수 있고, 시스템의 구축 및 유지 보수가 편리한 장점을 가지고 있어 대부분의 산업현장에서 현재까지도 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 PID 제어기는 파라미터를 동조한 최적화 정도에 따라 성능에서 큰 차이를 보이며 특히, 현장에서는 엔지니어의 경험에 의존하여 제어기의 파라미터를 주로 동조하고 있어 시스템에 대한 이해와 해석이 부족한 실정이다. 이러한 이유로 PID 제어기는 많은 장점도 가지고 있지만 시스템의 변화 및 불확실성에 대해 매우 취약할 수밖에 없는 단점도 동시에 가지고 있다.

이러한 배경에서, 개개인의 경험적 방식에 의존하는 제어기 설계가 아닌, 다양한 형태의 시스템에 공통적으로 적용할 수 있고, 보다 우수한 성능의 PID 제어기 파라미터 동조 기법의 개발이 요구되는 상황이다.

지금까지 여러 동조 규칙들이 제안되어 왔으나[2-4] 가장 대표적인 PID 동조법은 현장에서 많이 응용되는 Ziegler-Nichols(Z-N) 동조법이다[5]. 또한 고차 시스템을 시간지연을 갖는 1차 시스템인 FOPTD(First-Order Plus Time Delay) 시스템으로 근사화하여 제어기 파라미터를 동조하는 Cohen-Coon(C-C)법[6], IMC법[7], Lopez-ITAE법[8] 등이 있다. 최근에는 자연계에서 이루어지는 행동양식을 최적화 기법에 도입한 제어기 설계법이 연구되고 있으며 대표적인 것으로는 자연 현상인 자연선택과 진화 메커니즘을 모

방해 구현한 GA(Genetic Algorithm)가 있다[13]. 또한 근래에 제안된 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘[9]은 벌레나 새, 물고기 등의 군집에서 볼 수 있는 사회적 행동양식을 모사한 것으로, 다수의 개체들이 각 개체 스스로의 정보와 군집 전체의 정보를 바탕으로 탐색영역 안에서 최적해를 찾아간다는 개념을 최적화 탐색 알고리즘에 도입한 것이다. GA에 비해 알고리즘이 상대적으로 단순함에도 불구하고 우수한 최적화 성능을 갖는 장점 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다.

## 1.2 연구 내용과 구성

본 논문은 다양한 제어 시스템에서도 우수한 제어 성능을 보이는 PID 제어기의 비례이득, 적분이득 및 미분이득을 체계적이면서 최적으로 동조하는 문제를 다룬다. 이를 위해 Kenedy와 Eberhart가 제안한 PSO 알고리즘[9]을 최적화 도구로 사용하며, 주어진 시스템의 설정값 추종 성능을 개선하기 위해 제어기의 세 가지 이득을 체계적으로 동조하는 PSO 기반의 PID 제어기를 제안한다. 이때 사용하는 목적함수는 목표값과 출력의 차인 오차의 절대값인 IAE (Integral of Absolute Errors) 함수를 사용하며 PSO는 이 목적함수의 적합도가 높아지는 관점에서 제어기 이득을 탐색한다.

본 논문에서 제안하는 PSO 기반의 PID 제어기 성능은 시간지연을 갖는 1차, 2차 및 5차의 3가지 경우의 시스템에 대해 시뮬레이션을 실시하여 확인하며, 기존에 알려진 Z-N 동조법, C-C법, IMC법, Lopez-ITAE법과 그 응답 특성을 비교하여 제안하는 PSO 기반 PID 제어기의 우수성을 입증하도록 한다.

본 논문의 내용은 총 5장으로 구성되어 있으며, 각 장의 내용은 다음과 같다. 제1장은 서론이며 제2장에서는 본 논문에서 최적화 도구로 사용한 PSO의 알고리즘에 관하여 기술하였다. 제3장에서는 PID 제어기의 기본 이론과 구성 및 기존의 제어기 동조법에 대해 설명하고 제안하는 PSO 기반의 PID 제어기 설계법을 설명한다. 제4장에서는 제안한 PSO 알고리즘 기반의 PID 제어기의 유효성을 검증하기 위해 시간지연을 갖는 세 가지 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 실시하고 기존 방법으로 동조된 PID 제어기들의 응답을 비교한다. 마지막으로 제5장에서는 본 논문의 최종적인 결론을 맺고자 한다.

## 제 2 장 PSO 알고리즘

지금까지 많은 PID 제어기 동조규칙이 연구되었지만 보다 우수한 성능의 제어기 파라미터 선정 방법에 대한 연구는 계속해서 진행되고 있다. 본 논문에서는 제어 시스템에 대한 PID 제어를 설계하기 위해 생명체의 사회적 행동양식을 기반으로 하는 탐색 방법의 하나인 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 이용하고자 한다. PSO 알고리즘은 기본요소인 개체(particle), 현재 최적위치의 정보를 갖는 개체( $P_{best}$ ), 현재 최적위치의 정보를 갖는 개체 중 가장 최적의 위치를 갖는 개체( $G_{best}$ ), 개체의 위치와 속도의 연산으로 구성되며, 본 장에서는 PSO 알고리즘의 이론적 배경에 대해 살펴보기로 한다.

### 2.1 PSO 알고리즘의 특징

일반적으로 잘 알려진 자연현상을 모사한 최적화 알고리즘은 1975년 Holland가 자연선택과 진화 메커니즘을 이용해 구현한 GA(Genetic Algorithm)[9]이다. 이는 자연계 생물들이 그들의 유전자를 보존하고 생존하기 위하여 부모의 유전자들로부터 그들 자신의 유전자를 형성하고, 자연환경과 투쟁하며 적응해 가는 일련의 과정이 주어진 환경에서 최선이라는 사실에 입각하여 알고리즘으로 구현한 것이다.

이와는 다르게 PSO는 1995년 James Kennedy와 Russell Eberhart에 의해 개발된 알고리즘으로 벌레나 새, 물고기 등의 집단이 상호 정보교환 및 협력을 통하여 이동하는 형태를 모사한 최적화 기법이다[10-13]. 즉, PSO는 어떤 군집의 사회 모델과 인식 모델의 조합으로 이루어져 있는 것으로 생각할 수 있다. 사회적 요소는 개인이 자신의 경험을 무시하고 주위 사람들의 신조에 따라 행동을 조절한다는 것이고, 인식적 요소는 개인들을 독립된 개체로서 취급한다는 것을 의미한다. 즉, 무리가 먹이를 찾아가는 과정에서 무리 전체의 정보를 서로 공유한다는 가설과 무리 내부의 각 개체가 자신의 경험과 무리 전체에 공유되어 있는 정보를 사용하여 각 개체의 의견을 결정한다는 개념을 최적화 과정에 도입한 것이다. 이러한 PSO 알고리즘은 다른 휴리스틱 알고리즘

(heuristic algorithm)과는 달리 탐색공간에서 전역해(global solution)와 지역해(local solution) 사이를 균형 있게 탐색함으로써 지역해에 조기 수렴하는 것을 극복할 수 있다 [14]. 그리고 GA와 같은 최적화 알고리즘과 거의 동등한 성능을 가지지만 알고리즘이 단순하여 비교적 간단한 컴퓨터 코딩(coding)으로 구현 가능하며, 연산 및 수행 속도가 낮은 저사양의 컴퓨터 시스템에서도 적용 가능하다. 또한 연속성과 비연속성 문제에도 이용 가능한 여러 가지 장점들로 인해 최근 주목 받고 있으며 기존의 알고리즘으로는 해결하기 어려운 여러 분야에서 연구가 진행되고 있다[15-18].

PSO에서 각 개체(particle)들은 해 공간상에서 그들의 좌표를 기억하고 있으며 지금까지의 위치 중에서 최적의 위치를 갖는 개체를  $P_{best}$ (particle best)라고 하며 현재까지  $P_{best}$  중 가장 최적의 위치를 갖는 개체를  $G_{best}$ (generation best)라고 한다. 결국 PSO 알고리즘은 각 개체들이  $P_{best}$ 와  $G_{best}$ 를 향해 위치와 속도를 변경해 가는 최적화 기법이라고 말할 수 있다.

## 2.2 PSO 알고리즘의 구조

PSO 알고리즘에서는 각 개체의 위치에서 문제의 해를 구하여 최적의 해를 찾게 되는데, 각 개체는 최적의 해에 대한 정보를 서로 공유하고 공유된 정보를 바탕으로 최적의 해가 존재하는 위치로 모여든다. 모든 개체는 적합도 함수(fitness function)에 의해 평가된 각각의 값을 가지고 있으며 세대(generation)를 거듭하는 동안 가장 좋은 적합도를 갖는 개체가 최적의 해가 된다.

PSO 알고리즘에 사용하는 기본 연산자의 정의와 과정을 요약하면 다음과 같다.

### 2.2.1 개체 및 집단

PSO 알고리즘에서 다루는 군집 즉 집단의 기본 구성요소가 되는 것을 개체(particle)라 하고, 모든 개체들은 집단의 같은 체제 아래에서 개별적으로 동작한다. 각각의 개체는 각각의 해를 나타내며 D-차원 실수벡터로 표현한다. 따라서 D는 최적화하고자 하는 파라미터의 개수가 된다. k번째 세대의 i번째 개체  $x_i^k$ 는  $[x_{i1}^k, x_{i2}^k, x_{i3}^k, \dots, x_{iD}^k]$ 로 표현되며,  $x_{iD}^k$ 는 k번째 세대의 i번째 개체의 위치(값)를 나타낸다.

집단(swarm)은  $i(i=1,2,\dots,N)$ 개 개체의 집합을 의미하며 k번째 집단  $S(k) = [x_{11}^k, x_{21}^k, \dots, x_{N1}^k, \dots, x_{N1}^k]^T$ 로 표현 된다.

### 2.2.2 $P_{best}$ 및 $G_{best}$

탐색 공간을 움직이는 개체들은 현재 위치정보에 대한 적합도를 구하고 최적의 위치 정보를 위해 비교된다. 최적의 위치정보를 가진 개체를  $P_{best}$ 라고 한다.

최적의 위치정보를 가지는 개체들, 즉  $P_{best}$ 의 모든 개체 중 가장 최적의 위치정보를 나타내는 개체를  $G_{best}$ 라 한다. 따라서  $G_{best}$ 는 주어진 문제의 최적해가 된다.

### 2.2.3 초기집단의 생성 및 적합도 평가

주어진 탐색 공간에서 위치에 대한 탐색을 시작하려면 각 개체는 무작위의 초기속도를 가지고 임의의 위치에서 시작하게 된다. 초기에 시작되는 각 개체 위치는 유일한 위치 정보를 갖고 있기 때문에 각 개체의 위치는  $P_{best}$ 가 된다. 그런 다음 초기 위치의 정보 중에서 첫  $G_{best}$ 가 결정된다. 개체  $i$ 는 총  $D$ 개가 존재하며, 각 개체의 속도 벡터  $v_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, D$ )와 위치 벡터  $X_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, D$ )는 각각 식 (2.1)과 식 (2.2)를 이용하여 임의로 생성한다.

$$x_i = x^{\min} + (x^{\max} - x^{\min})\text{rand}() \quad (2.1)$$

$$v_i = v^{\min} + (v^{\max} - v^{\min})\text{rand}() \quad (2.2)$$

여기서,  $v^{\min}$ 과  $v^{\max}$ 는 각각 최소 및 최대 제한속도이고,  $x^{\min}$ 과  $x^{\max}$ 는 각각 최소 및 최대 위치 경계이다.  $\text{rand}()$ 는 [0 1] 사이에서 균등 분포된 임의의 값이다.

그리고 각 개체들의 적합도를 평가하기 위해 주어진 최적화 문제에 따라 적절한 목적함수를 선정한다. 각 세대에서 계산된 개체의 적합도 값들은 이전 세대의 각 개체의 적합도 값과 비교하여 이전 세대 값보다 좋으면  $P_{best}$ 로 저장되며, 이전 세대 값보다 좋지 않으면 이전 세대의 개체가  $P_{best}$ 로 저장된다. 이때 전체 집단의  $P_{best}$ 중에서 가장 좋은 적합도 값을 가진 개체는  $G_{best}$ 로 저장된다.

### 2.2.4 속도 업데이트

현재의 위치 정보 및 속도 정보를 바탕으로  $P_{best}$ 와  $G_{best}$ 의 위치 정보를 이용하여 다음 세대의 속도가 업데이트 된다. 개체의 속도는  $P_{best}$ 와  $G_{best}$ 의 상대적 위치에 따라 변경되는데, 여기서 PSO 탐색 성능의 효과적인 개선을 위해 식 (2.4)과 같이 이전의 속도

값과 관성 하중  $w$ 를 결합한 방법을 적용하였다.

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1 \text{rand}_1() (P_{id \text{ best}}^k - x_{id}^k) + c_2 \text{rand}_2() (G_{id \text{ best}}^k - x_{id}^k) \quad (2.4)$$

$$v_{id}^k = \begin{cases} v_{\max}^k, & \text{if } v_{id}^k > v_{\max}^k \\ v_{\min}^k, & \text{if } v_{id}^k < v_{\min}^k \end{cases}$$

여기서,  $v_{id}^k$ 는  $k$ 번째 세대의  $i$ 번째 개체 속도이며,  $x_{id}^k$ 는  $k$ 번째 세대의  $i$ 번째 개체 위치이다.  $c_1$ 과  $c_2$ 는 각 개체가  $P_{\text{best}}$ 와  $G_{\text{best}}$ 로 향하는 확률적인 가속 상수(acceleration constant)로서 각각 인지성과 사회성을 나낸다. 그리고  $w$ 는 이전 속도에 대한 관성하중(inertia weight)으로 전역 탐색과 국지 탐색을 조화시키는 역할을 하며 일반적으로 양의 실수, 시간의 선형 또는 비선형 함수를 사용할 수 있다. 관성하중을 큰 값으로 설정한 경우에는 전역 탐색(global search)이 강화되지만 최적해의 위치를 지나치거나 갑작스런 방향 전환을 유도할 수 있기 때문에 지역 극소에 빠지기 쉽다. 반대로 작은 값으로 설정한 경우에는 지역 탐색(local search)이 강화되지만 최적해 공간을 충분히 탐색하지 못할 수 있으며, 속도가 느려지게 되는 문제점이 발생한다. 관성 하중을 선정하는 방법은 다음과 같은 방법이 있다[14].

#### ① LDIW(Lineally Decreasing Inertia Weight)

LDIW는 관성하중을 선형감소 함수로 정의한다. 즉, 가장 큰 값부터 가장 작은 값까지 PSO의 세대수에 따라 선형적으로 감소하는 형태이다. 이는 탐색 초기에는 관성 하중을 큰 값으로 선정하여 개체의 전역 탐색(global search)을 강화시키고, 탐색이 진행될수록 관성하중이 작아지게 된다. 이것으로 탐색 수렴부의 탐색 속도가 느려지지만 지역 탐색(local search)이 강화되는 방법으로서 본 논문에서는 이 방법을 사용하며 식 (2.5)와 같다.

$$w_k = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{N} k \quad (2.5)$$

여기서  $w_{\max}$ 는 관성하중  $w$ 의 최대값,  $w_{\min}$ 은 관성하중  $w$ 의 최소값,  $N$ 은 최대 세대수,  $k$ 는 현재의 세대수이다

#### ② SAIW(Simulated Annealing Inertia Weight)



SAIW는 앞에서 설명한 LDIW와 마찬가지로 감소함수의 한 형태이지만 식 (2.6)와 같이 비선형 감소함수를 사용한다는 점에서 다르다. 즉, 탐색초기에는 관성 하중을 큰 값으로 선정하여 개체의 전역 탐색을 강화시키는 점에서는 LDIW와 동일하다. 그러나 탐색이 진행될수록 LDIW 보다 관성하중의 감소를 더욱 둔하게 하여 전역 탐색의 비중을 더 크게 유지한다는 점에서 차이가 있다.

$$w_k = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \lambda^{(k-1)} \quad (2.6)$$

여기서  $w_{\max}$  는 관성하중  $w$ 의 최대값,  $w_{\min}$  은 관성하중  $w$ 의 최소값,  $\lambda$ 는 0.95이다.

### ③ CSIW(Chaotic Sequence Inertia Weight)

CSIW는 이름과 같이 일정한 증가 또는 감소형태가 아니라 임의의 난수에 의해 결정되어지는 형태이므로 탐색의 진행과정과 관계없이 관성하중은 계속 변화된 값을 사용하게 된다. 만약, 최대 세대수가 증가하게 되면 탐색 세대마다 매번 다른 관성하중이 사용되게 되므로 주어진 탐색의 조건과 상황을 잘 고려해야 한다. CSIW의 관성하중은 식 (2.7)과 같다.

$$w_k = a w_{k-1} + (1 - w_{k-1}) \quad (2.7)$$

여기서  $w_k$  는 0에서 1사이의 값(단,  $w_0$  는 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 이외의 값),  $a$ 는 0에서 4까지의 값이다.

### ④ FIW(Fixed Inertia Weight)

FIW는 관성하중을 일정한 값에 고정시킨 것으로서 탐색 초기부터 탐색이 진행되는 전 과정에서 동일한 값을 사용하는 형태이다. 일반적으로 기본적인 형태의 PSO 알고리즘에서는 이와 같이 FIW를 사용하는 경우가 많다. 식 (2.8)는 FIW의 한 형태를 나타낸 것이다.

$$w = \frac{1}{2 \ln 2} \quad (2.8)$$

지금까지 설명한 관성하중 선정 방법에 따른 세대별 관성하중 변화를 그래프로 나타내면 Fig. 2.1과 같다. 관성하중의 적절한 선택은 PSO 알고리즘의 탐색 성능에도 영향을 미치는 것으로 연구되고 있으므로 탐색환경에 따라 적절한 선정이 필요하다.



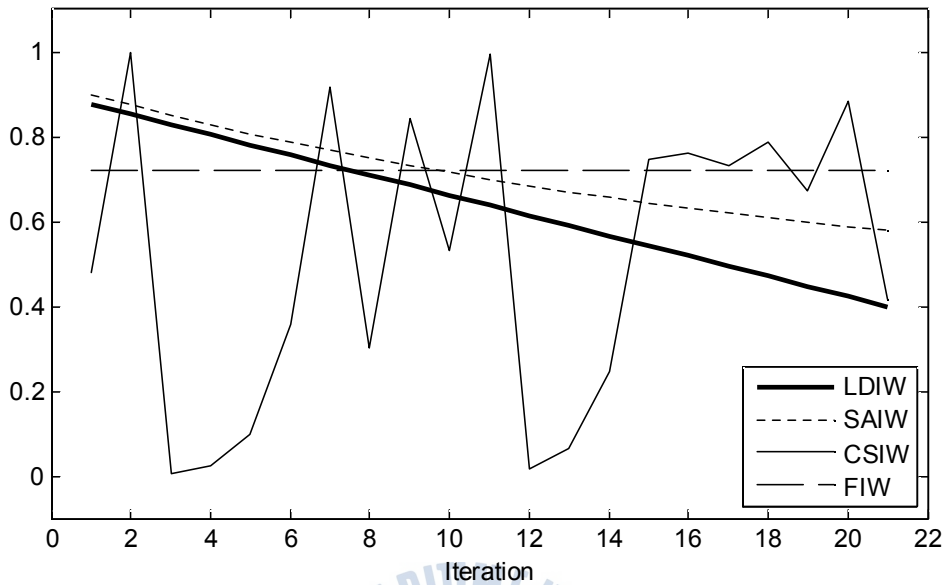


Fig. 2.1 Change of inertia weights for LDIW, SAIW, CSIW and FIW

## 2.2.5 위치 업데이트

전 단계에서 구해진 속도를 바탕으로 현재 위치 정보를 업데이트 하게 된다. 식 (2.9)를 이용하여 개체의 새로운 위치 정보를 얻는다.

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2.9)$$

$$x_{id}^k = \begin{cases} x_{max}^k, & \text{if } x_{id}^k > x_{max}^k \\ x_{min}^k, & \text{if } x_{id}^k < x_{min}^k \end{cases}$$

2차원 공간에서 어떤 개체의 속도와 위치의 변경에 관한 개념을 Fig. 2.2와 같이 나타낼 수 있다. 단, 편의상 관성하중  $w$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ 는 모두 1로 동등한 가중치를 갖는 것으로 한다.  $k$ 번째 세대의  $i$ 번째 개체의 현재 위치  $x_{id}^k$ 와 속도  $v_{id}^k$ 는 주어진 것으로 한다.

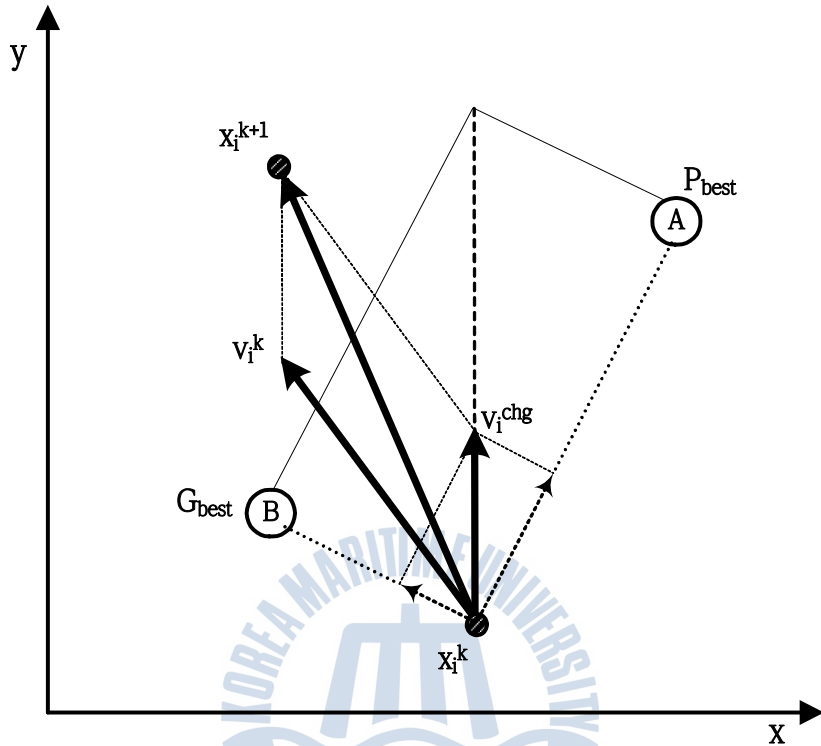


Fig. 2.2 Update concept of particle velocity and position

예를 들어 이 개체가 위치 “A”를  $P_{best}$ , 위치 “B”를  $G_{best}$ 로 기억하고 있을 때, 개체는 현재 향하고 있는 방향으로부터 이제까지 자신이 탐색한 해 중에 제일 우수한 해  $P_{best}$ 와 집단 전체가 발견한 해 중에 제일 우수한 해인  $G_{best}$ 가 있는 방향으로 자신의 방향을 변경하고자하며 이것을  $v_i^{chg}$ 의 벡터로 표시한다. 개체의 속도 변경은 현재의 속도  $v_i^k$ 와  $v_i^{chg}$ 를 더하게 되며 속도를 변경한 후의 개체속도  $v_i^{k+1}$ 에 의해 개체는 새로운 위치  $x_i^{k+1}$ 로 자신의 위치를 변경한다.

## 2.2.6 종료 조건

종료 조건에 도달하기 전까지는 앞에서 설명한 과정을 계속적으로 반복하여 수행하게 된다. 종료조건으로 고려될 수 있는 것은 첫째, 지정한 최대 세대에 도달하거나 둘째, 최종적으로  $G_{best}$ 의 결과가 목표로 하는 문제의 해에 만족하거나 셋째, 일정 수렴조건을 만족했을 경우를 생각해 볼 수 있다. PSO 알고리즘이 종료되면 탐색 공간상의 최적 위치는 마지막 세대에 생성된  $G_{best}$ 가 된다.

### 2.2.7 PSO 알고리즘의 학습과정

실제 PSO 알고리즘을 이용하여 전역 최적해를 구하는 과정을 간략화 하면 다음과 같다.

**단계 1.** 탐색 개체의 차원을 초기화

**단계 2.** 초기집단 형성

**단계 3.** 적합도 평가

**단계 4.** 각 개체에 대한 과거의 최적 점  $P_{best}$  결정

If 현재 개체의 적합도  $> P_{best}$ , then  $P_{best} = \text{현재 } P_{best}$

else  $P_{best} = \text{과거 } P_{best}$

**단계 5.** 현재와 과거의  $G_{best}$  비교·평가

If 현재  $P_{best}$ 의 적합도  $> G_{best}$ , then  $G_{best} = \text{현재 } P_{best}$

else  $G_{best} = \text{과거 } G_{best}$

**단계 6.** 속도 업데이트

$$v_i^{k+1} = w(k) v_i^k + c_1 \text{rand}() (P_{best\ i}^k - x_i^k) + c_2 \text{rand}() (G_{best}^k - x_i^k)$$

**단계 7.** 위치 업데이트

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}$$

**단계 8.** 종료조건

종료조건을 만족하면 종료, 그렇지 않으면 **단계 3** 부터 반복

Fig. 2.3은 PSO 알고리즘을 간략히 나타낸 것이다.

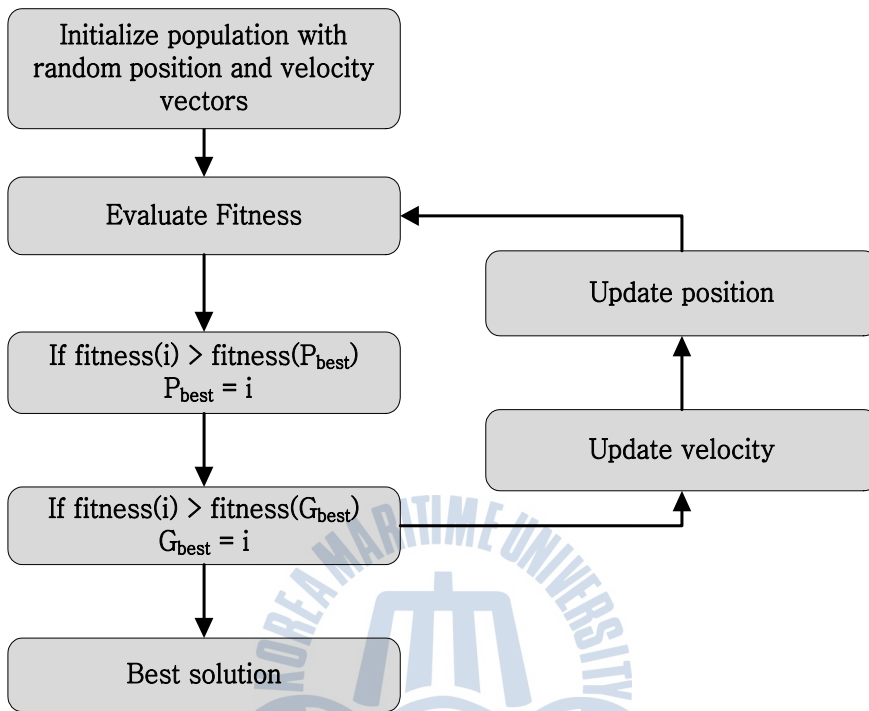


Fig. 2.3 Flowchart of PSO algorithm

## 제 3 장 PSO-PID 제어기 설계

PID 제어기 파라미터를 제어시스템에 대해 적절히 조종하여 선정하는 것을 PID 제어기의 동조(tuning)라 하며, 동조 결과에 따라 PID 제어기의 성능이 결정된다. 일반적으로 산업 현장에서 사용되는 시스템은 고차이면서 비선형적인 동특성을 갖지만 대부분 동작점 부근에서는 시간지연을 갖는 1차 시스템으로 근사화 할 수 있다. 이렇게 시스템이 근사화되면 기존의 동조방법을 사용하여 제어기의 파라미터를 적절히 결정할 수 있다.

PID 제어기 동조방법은 제어기 응용 초기부터 제어기의 우수한 성능을 위해 연구자의 관심 대상이 되어 왔으며 이러한 필요성과 현장의 요구에 따라 현재까지 매우 다양한 동조 기법이 개발되어 왔다. 본 장에서는 일반적인 PID 제어기의 특성에 대해 알아보고, 근사화된 시스템을 이용하여 제어기를 동조하는 대표적인 몇 가지 방법과 그 특징에 대해 살펴본다.

또한, 본 논문에서 제안하고자 하는 제어기 동조법으로 PSO 알고리즘을 기반으로 하여 PID 제어기를 설계하는 방법에 대해 알아본다.

### 3.1 PID 제어

PID 제어는 가장 보편적이고 실용적이어서 현장에서 가장 많이 사용되고 있으며, 목표값과 현재 출력과의 오차에 대해 비례(proportional), 적분(integral) 및 미분(derivative)을 통하여 적절한 제어입력  $u$ 를 구한다. 이를 시스템에 적용하여 원하는 목적에 맞게 제어하며 이는 식 (3.1)과 같다.

$$u = K_p e + K_i \int e \, dt + K_d \frac{de}{dt} + u_0 \quad (3.1)$$

단,  $e$ 는 오차신호,  $u_0$ 는 초기상태의 제어입력,  $K_p$ 는 비례이득,  $K_i$ 는 적분이득,  $K_d$ 는 미분이득이다. 위와 같은 PID 제어기의 출력은 현재의 오차에 단순 비례하는 동작, 지

금까지의 과거 오차들을 모두 합한 출력을 내는 동작, 그리고 앞으로의 오차가 어떻게 변화할 지를 고려하여 출력을 내는 이 세가지 동작에 곱해지는 이득의 크기에 따라 특성이 크게 달라지며, 각 제어동작의 특성은 다음과 같다.

### ① P(비례) 제어

P 제어는 식 (3.2)와 같이 목표값과 현재 출력과의 오차에 적절한 비례이득  $K_p$ 를 곱하여 제어기 출력을 만들어낸다. Fig. 3.1과 같이 제어기 출력의 전체범위와 그에 해당하는 오차의 크기와의 비를 비례대(PB, Proportional Band)라고 하며 PB의 크기에 따라 제어기의 민감도가 결정된다. Fig. 3.1에서 알 수 있듯이 PB는 100%의 출력 변화를 만들어 내는 데에 필요한 입력신호의 변화를 퍼센트[%]로 나타낸 값이다. 예를 들어, 비례대가 10%라면 제어기의 입력인 오차가 10%가 되면 제어기가 100% 출력을 낸다는 것이다. 따라서 PB는 비례이득과 식 (3.3)과 같은 관계가 있다.

$$u_p = K_p e + u_0 \quad (3.2)$$

$$PB = \frac{100}{K_p} \quad (3.3)$$

Fig. 3.1 The Proportional band

“0” 형 시스템의 P 제어를 적용하면 정상상태에서 오프셋(offset)이 발생하는데 일반적으로 이를 제거하기 위해 적분동작을 추가하여 PI 제어기 형태로 사용한다.

## ② I(적분) 제어

I 제어는 오차를 적분하고 적절한 이득을 곱해 제어기 출력을 선정하는데 I 동작만으로는 제어기 구성이 어려워 P 동작과 결합하여 사용한다. P 동작은 비례대가 크면 오프셋이 발생하고 이를 줄이기 위해 비례대를 줄이면 시스템이 불안정해진다. 여기에 I 동작을 같이 사용하면 적절한 크기의 비례대에서 오프셋을 제거할 수 있다. 이와 같은 동작으로 인해 측정값(PV)은 설정치(SP)와 결국 같아지게 되므로 I 동작을 reset 동작이라고 하고 이 때의 적분시간을 reset time이라 한다. PI 제어에서 reset time은 스텝입력이 주어질 때 I 동작이 P 동작 출력과 크기가 같아지는 시간에 해당하며, 식 (3.4)에서 I 동작 크기는 reset time으로 조정하고 이 시간이 작을수록 I 동작이 커진다. reset time이 너무 작게 되면 P 동작처럼 시스템이 불안정하게 된다.

오차에 대한 I 제어기의 동작은 Fig. 3.2에 나타나고 있다. 오차의 합이 0이면 적분제어기는 그 당시의 출력상태로 고정되며, 오차가 0이 아니면 출력은 1%의 오차에 대하여  $K_i(\%/sec)$ 의 비율로 출력이 증가 또는 감소한다.

$$u_i = K_i \int e \, dt + u_0 \quad (3.4)$$

여기서  $K_i = K_p/T_i$ 이고,  $T_i$ 는 적분시간(reset time)이다.

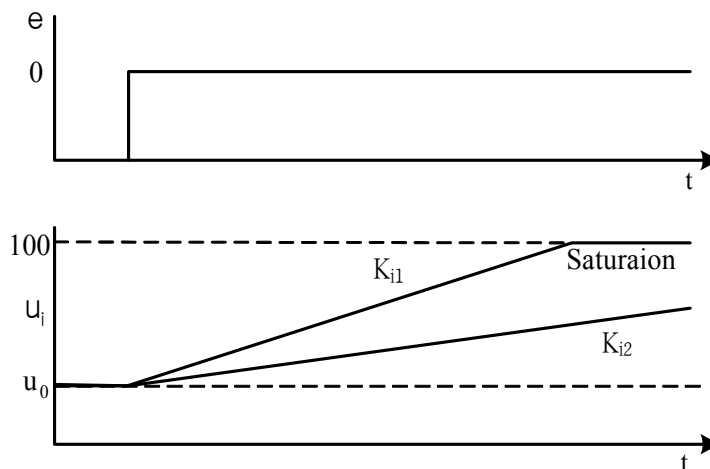


Fig. 3.2 Integral control action

Fig. 3.2의 I 동작에서  $K_{i1}$ 의 경우와 같이 포화(saturation)로 인해 제어기의 출력이 포화기의 한계치에 도달되면 출력이 한계치에 도달하여 일정한 값으로 제한되고 적분기에는 오차가 계속 누적되어 커지는 현상이 일어나는데 이를 적분기 와인드업(windup) 현상이라 한다. 이 때문에 포화를 고려하지 않고 설계된 제어기를 포화가 존재하는 시스템에 적용하면 시스템 성능이 심하게 왜곡될(일반적으로 오버슈트가 커지고 정정시간이 길어짐) 뿐만 아니라 경우에 따라서는 불안정하게 될 수도 있다.

적분기 와인드업을 완화시킬 수 있는 대표적인 방법으로 추종 안티와인드업(Tracking-AW : Tracking Anti-Windup)법[19], 조건부 적분 안티와인드업(CI-AW : Conditional Integration Anti-Windup)[20], 가변구조 PID 안티 와인드업(VSPID-AW : Variable Structure PID Anti-Windup)법[21] 등이 있다.

### ③ D(미분) 제어

D 제어는 오차의 미분 즉, 현재의 오차 변화율에 대해 반응하며 예측제어(rate action 또는 anticipatory control)라고도 한다. 식 (3.5)와 같이 표현되는 미분제어기의 출력은 오차가 일정할 때의 제어기 출력은 0이 되므로 단독으로는 사용될 수 없으며 비례제어기나 적분제어기와 함께 사용되어야 한다.

미분 제어는 주로 적분제어의 단점을 보완해 주기 위해 사용하며, 비례제어나 적분제어가 과도하게 작용할 때 이를 감쇠시키는 역할을 하여 오버슈트나 진동현상을 감소시키고 과도응답을 개선시켜 준다.

$$u_d = K_d \frac{de}{dt} + u_0 \quad (3.5)$$

여기서  $K_d = K_p T_d$  이고,  $T_d$  는 미분시간(rate time)이다. 미분시간은 미분동작에서 시간 자체가 비례계수로 작용하므로 미분시간을 크게 할수록 미분동작의 출력이 커지게 된다.

미분제어기는 Fig. 3.3과 같이 오차 변화율에 따라 제어기 출력이 급격히 변화할 수 있기 때문에 동적 응답특성이 빠른 시스템에서는 주의 깊게 사용해야 한다. 순수한 미분동작에서는 입력신호 중 노이즈와 같은 고조파 성분을 크게 하여 시스템을 불안정하게 할 수 있어서 노이즈가 많은 시스템에서는 순수 미분동작보다는 미분요소에 1차 지연을 부가한 불완전 미분동작으로 하는 경우가 많다.



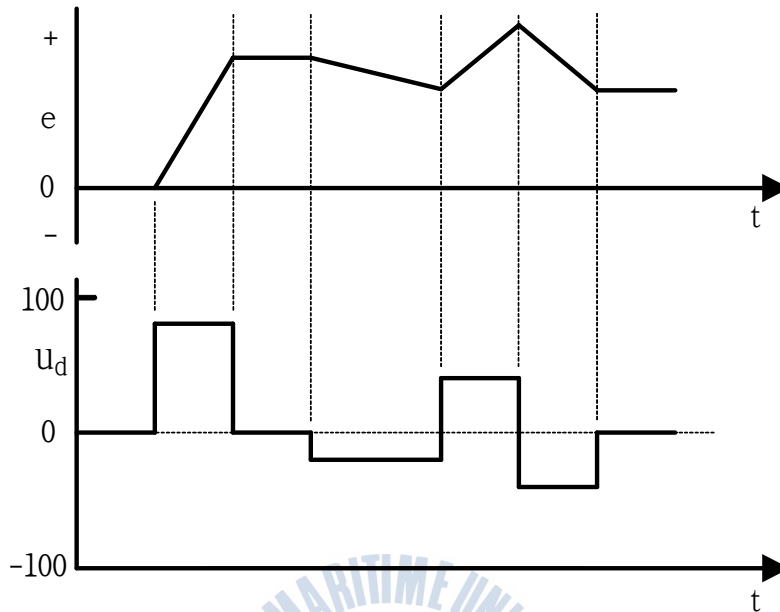


Fig. 3.3 Derivative control action

P 동작과 I 동작에 추가하여 D 동작이 사용되는 경우의 예는 선박 주기관의 실린더 냉각수 온도 제어를 들 수 있다. 주기관의 냉각수 온도를 엔진 출구측에서 제어하는데 출구측에서 일정온도로 제어하면 배관계통의 시간지연 요소가 제어계에 포함되므로 입구온도를 일정하게 제어하는 것보다 상대적으로 제어가 어렵다. PI 제어로는 불안정 특성으로 되기 쉬우므로 D 동작(미분동작)을 함께 사용해야 한다.

#### ④ PID 제어

식 (3.8)의 PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어기는 현재의 오차에 비례이득을 곱하는 P(비례) 동작, 초기시작부터 현재까지 누적 오차에 적분이득을 곱한 I(적분) 동작, 현재 오차의 변화율에 미분이득을 곱한 D(미분) 동작이 병렬 혼합된 형태로 모든 값을 합산하여 제어 입력을 완성한다. P 동작에서 발생하는 오프셋을 I 동작을 이용하여 효과적으로 없애면서 D 동작을 이용하여 오버슈트와 정정시간을 줄여 빠른 응답을 얻을 수 있으므로 대부분의 제어문제에 성공적으로 적용될 수 있다. Fig. 3.4에서는 세 가지 동작이 결합된 제어기의 오차에 대한 제어기 출력을 나타내고 있다.

$$u_{pid} = K_p e + K_i \int e \, dt + K_d \frac{de}{dt} + u_0 \quad (3.8)$$

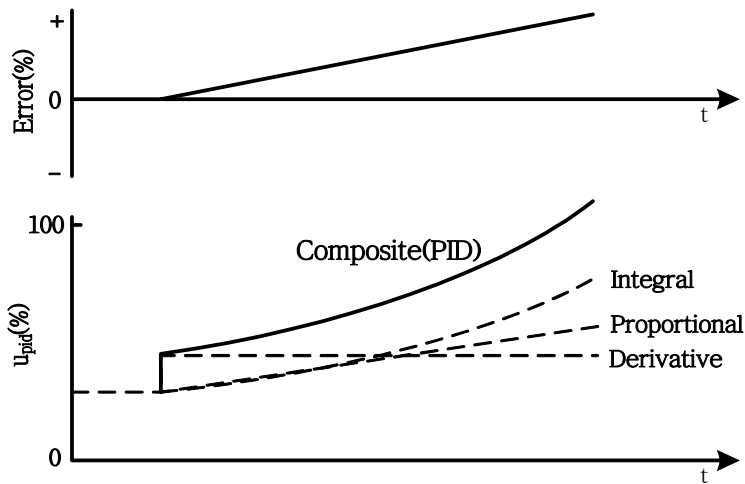


Fig. 3.4 Proportional-Integral-Derivative control action

일반적인 PID 제어 시스템은 Fig. 3.5과 같이 제어기와 제어대상을 포함하는 폐루프 블록 다이어그램으로 나타낼 수 있으며, 많은 제어기 중 산업현장에서 실제로 가장 널리 이용되고 있는 PID 제어기는 앞에서 설명한 비례이득  $K_p$ , 적분이득  $K_i$ , 미분이득  $K_d$ 의 값에 따라 제어특성이 크게 달라진다. PID 제어기의 각 파라미터가 폐루프 시스템에 미치는 영향을 정리하면 Table 3.1과 같다.

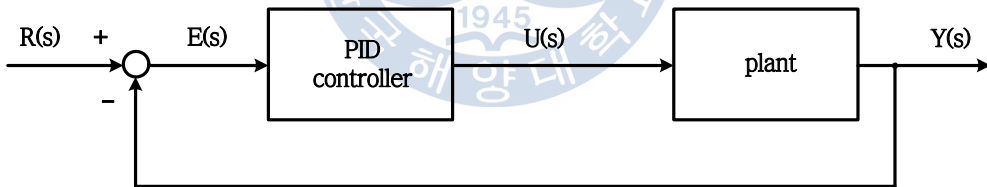


Fig. 3.5 Block diagram of PID control system

Table 3.1 The effect of parameter change for PID control system

	상승시간	오버슈트	정정시간	정상상태 오차
$K_p$ 증가	감소	증가	약간 변동	감소
$K_i$ 증가	감소	증가	증가	제거
$K_d$ 증가	약간 변동	감소	감소	약간 변동

일반적으로 현장에서 파라미터 조정은 제어대상의 특성과 엔지니어의 경험에 의해 시행착오의 결과로 결정된다. 이를 위해서는 PID 제어기 파라미터 조정에 따른 시스템 응답특성을 잘 알고 있어야 제어기의 적절한 동조가 가능하며 제어장치의 성능을 보장하기 위해서는 PID 제어기의 파라미터를 적절히 조정하여야 한다.

## 3.2 PID 제어기 동조규칙

PID제어기의 동조는 제어기 응용 초기부터 연구 대상이 되어온 중요한 문제로 여러 가지의 동조 기법이 개발되었고, 동조 방법도 매우 다양하며 또 그 방법에 따라 파라미터 값도 조금씩 다르다. 현재까지 PID 제어기의 파라미터를 동조하기 위한 많은 방법이 제안되었으며, Z-N 방법, C-C방법, IMC법, Lopez-ITAE법 등이 대표적이다. 이 중 산업계에서도 널리 사용되는 동조 방법이 Z-N 동조법이다. 본 논문에서는 대표적으로 사용되는 몇 가지 동조법과 그 특성에 대해 살펴보고자 한다.

### 3.2.1 Ziegler-Nichols 동조법

이 방법은 1942년 Ziegler와 Nichols가 플랜트 변화에 따른 P, I, D 계수의 최적 설정 기법을 감도 영향을 고려하면서 체계적으로 완성한 동조법이다. 지금까지도 변수 모델로 공정을 특성화하지 않는 장점 때문에 대부분의 PID 제어기 설계 시 기본적으로 이용되고 있다. Ziegler-Nichols 동조 방법을 크게 구분하면 오프라인 상에서 수행하는 개루프 방식과 제어기를 제어대상에 장착한 상태에서 수행하는 폐루프 방식이 있다.

#### ① 개루프 동조법(과도응답법)

제어기를 개루프 상태에서 단위 계단 입력에 대한 제어량의 변화 상태를 보면서 정상이득(gain)  $K$ , 시정수(time constant)  $\tau$ , 지연시간(time delay)  $L$ 을 얻고 이를 토대로 PID 제어기의 계수를 동조하는 기법이다. 즉 제어대상이 식 (3.9)와 같이 시간지연을 갖는 1차(FOPTD)형으로 근사화될 수 있는 경우에만 적용될 수 있다. 대부분의 산업 프로세스들은 복잡하고 고차이지만 FOPTD와 같은 응답 특성을 가지고 있어 이를 적용할 수 있다.

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s} e^{-Ls} \quad (3.9)$$

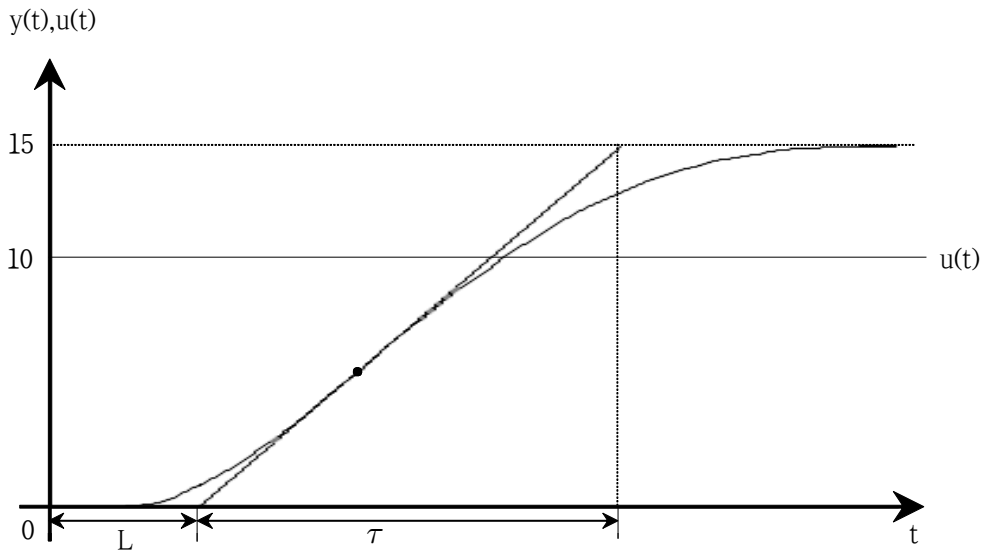


Fig. 3.6 Response curve for the unit step input

Fig. 3.6는 개회로 제어시스템의 단위계단 입력에 대한 응답곡선으로부터  $K$ ,  $\tau$ ,  $L$ 을 구하는 것을 보여주며 이를 Table 3.2에 대입하여 파라미터를 구한다. 고차의 제어대상일 경우에는  $\tau$ 와  $L$ 이 일률적으로 결정되지 않는 경향이 있어 현장 경험에 의한 조정이 필요하다.

Table 3.2 PID tuning rules by the open-loop method

Parameter Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{KL}$	-	-
PI	$0.9 \frac{\tau}{KL}$	$3.3L$	-
PID	$1.2 \frac{\tau}{KL}$	$2.0L$	$0.5L$

## ② 페루프 동조법(한계감도법)

페루프 동조법은 제어응답이 기본 진동의 1주기당 진폭의 감쇠비가 1/4이 되도록 제어기의 파라미터를 동조하는 방법이다. 폐회로 시스템에 비례 제어기를 넣고, 비례이득( $K_p$ )만 증가시켜 출력  $y(t)$ 가 일정한 진폭으로 진동할 때의 한계이득(ultimate gain)과 한계주기(ultimate period)를 얻은 다음 PID 제어기의 파라미터를 동조한다. Fig. 3.7은 비례이득을 갖는 폐회로 제어시스템을 보여주고 있다.

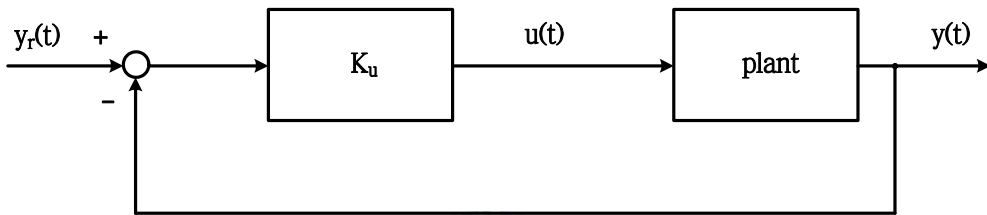


Fig. 3.7 Closed-loop control system with proportional gain

한계 진동할 때의 비례계수를 한계이득  $K_u$ , 응답곡선의 한계주기를  $T_u$ 라고 한다. Fig. 3.8의 응답곡선으로부터  $T_u$ 를 구한 후, Table 3.3을 이용해 계수를 구한다.

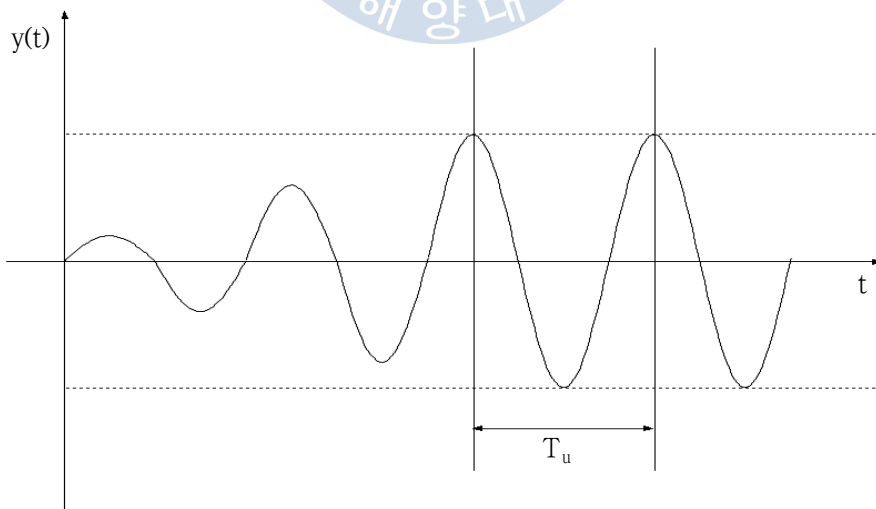


Fig. 3.8 Response curve and ultimate period

**Table 3.3** PID tuning rules by the closed-loop method

Parameter Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 K_u$	-	-
PI	$0.45 K_u$	$0.83 T_u$	-
PID	$0.6 K_u$	$0.5 T_u$	$0.125 T_u$

페루프법은 공정 이득의 안정도를 유지하는 수준에서 제어해야 하고, 많은 시행착오에 의해 한계이득과 한계주기에서 페루프 이득을 얻기 때문에 시간이 많이 소비되는 단점이 있다. 또한 실제의 플랜트에서 안정한계까지 진동을 계속한다는 것은 쉽지 않다.

### 3.2.2 Cohen-Coon 동조법

이 동조방법은 Fig. 3.9와 같이 플랜트의 개루프 응답곡선으로부터 기울기가 가장 큰 변곡점에서 접선을 그어 시간 축과 접선의 교차점을 찾아내고, 이들 값으로부터 PID 파라미터를 도형적으로 결정한다. 본 동조법은 Z-N 동조법과 같이 개루프 응답이 FOPTD 시스템으로 근사화 되어야 하며, 단위계단응답의 진폭 감쇠비가 1/4에 가깝도록 동조한다. 특히 Z-N 동조법에서 시간지연(L)이 시정수( $\tau$ )보다 큰 경우에는 정상상태 응답이 느리기 때문에 이를 보완하고 있다.

시간 축과 접선의 교차점에서 시간지연 상수(L)를 측정하고, 변곡점과 교차점 사이의 시간 간격을 시정수( $\tau$ )로 측정한다.

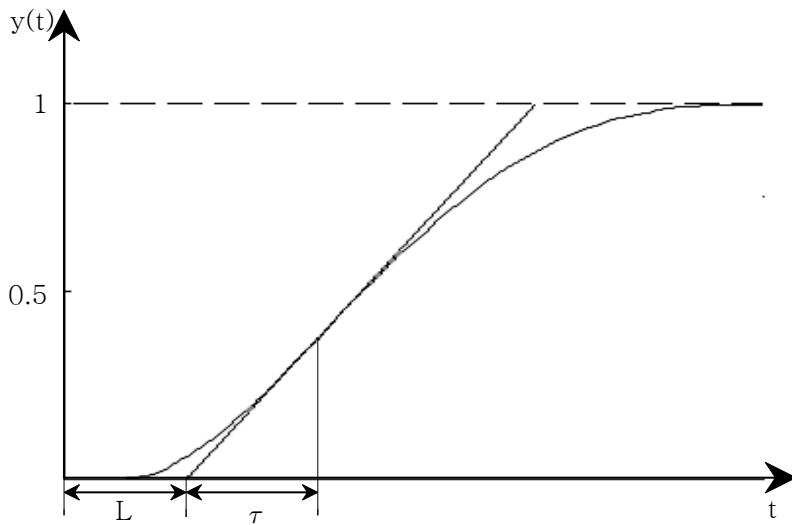


Fig. 3.9 Response curve for the unit step input

Fig. 3.9와 같은 인디셜 응답곡선을 통해 측정된 위의 값들을 토대로 한 PID 제어기의 각 파라미터는 Table 3.4와 같다.

Table 3.4 PID tuning rules by the Cohen-Coon method

Parameter Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{KL} + \frac{1}{3K}$	-	-
PI	$\frac{\tau}{KL} (0.9 + \frac{1}{12} \frac{L}{\tau})$	$L \frac{30 + 3 \frac{L}{\tau}}{9 + 20 \frac{L}{\tau}}$	-
PID	$\frac{\tau}{KL} (\frac{4}{3} + \frac{1}{4} \frac{L}{\tau})$	$L \frac{32 + 6 \frac{L}{\tau}}{13 + 8 \frac{L}{\tau}}$	$L \frac{4}{11 + 2 \frac{L}{\tau}}$

### 3.2.3 IMC 동조법

내부 제어 모델(IMC : Internal Model Control) 동조법은 폐루프 내에 공칭모델을 포함시켜 플랜트와 모델간의 오차를 궤환하여 새로운 제어입력을 만드는 방법이다. 이 방법은 플랜트와 모델간의 모델링 오차를 보상할 수 있는 유용한 방법이지만, 사용되는 모델은 일반적으로 플랜트보다 저차이며 플랜트의 불안정한 성분을 포함해야 한다는 제한조건이 있다.

IMC 동조법에 의한 PID 제어기의 각 파라미터는 Table 3.5와 같다.

**Table 3.5** PID tuning rules by the IMC method

Parameter Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
PI	$\frac{2\tau+L}{2\lambda K}$	$\tau + \frac{L}{2}$	
PID	$\frac{2\tau+L}{2K(\lambda+L)}$	$\tau + \frac{L}{2}$	$\frac{\tau L}{(2\tau+L)}$

단위계단입력에 대한 응답곡선에서 이득을  $K$ , 시정수를  $\tau$ , 지연시간을  $L$ , 그리고  $\lambda$ 를 시간상수라고 한다. 이때 너무 작은  $\lambda$ 를 사용하게 되면 빠른 응답을 얻을 수 있으나 진동하거나 불안정해질 수 있다. 대개 PI 제어기의 경우  $\lambda \geq 1.7L$ 을, PID 제어기의 경우  $\lambda \geq 0.25L$ 을 사용한다.

### 3.2.4 Lopez-ITAE 동조법

$G(s) = \frac{K}{1+\tau s} e^{-Ls}$ 의 시간지연을 갖는 1차 모델과 계단상의 외란에 대해 시간곱 절대오차 적분(ITAE : Integral Time-weighted Absolute Errors)의 목적함수를 최소로 하도록 PID 제어기의 계수를 결정하는 방법이다. ITAE 목적함수는 오차의 절대값에 시간을 곱해서 적분하기 때문에 응답의 정정시간이 짧아지는 장점이 있으며 식 (3.10)과 같다

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3.10)$$



시뮬레이션에 의해  $\frac{\tau}{L}$ 을 1에서 20까지 변화시키고  $a(\frac{\tau}{L})^b$ 로 주어지는 식에 대해 최소자승법으로 a, b를 구한다. Table 3.6은 Lopez-ITAE법[8]에 의한 PID 동조규칙을 보여주며, 단위계단 입력에 대한 응답곡선에서 이득을 K, 시정수를  $\tau$ , 지연시간을 L이라고 한다.

**Table 3.6** PID tuning rule by the Lopez ITAE method

Parameter Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
PI	$\frac{0.586}{K}(\frac{\tau}{L})^{0.196}$	$\tau \left( 1.030 - 0.165(\frac{L}{\tau}) \right)$	-
PID	$\frac{0.965}{K}(\frac{\tau}{L})^{0.850}$	$\tau \left( 0.769 - 0.1465(\frac{L}{\tau}) \right)$	$\tau \left( 0.306(\frac{L}{\tau})^{0.929} \right)$

### 3.3 PSO-PID 제어기 설계

#### 3.3.1 PSO 기반 PID 제어기

PSO 기반 PID 제어기는 앞 절에서 설명한 PSO 알고리즘을 이용하여 PID 제어기 파라미터를 최적으로 동조하는 것이며, 이를 통해 주어진 제어대상의 제어응답을 향상시킬 수 있다. PSO 기반의 PID 제어기의 구조는 Fig. 3.10과 같다.

이 제어 시스템은 그림을 통해 확인할 수 있듯이 PID 제어기와 PSO 알고리즘 모듈로 구성되어 있다. PSO 알고리즘 모듈은 오프라인(off-line)에서 주어진 시스템이 양호한 제어응답을 갖도록 설계자가 선정한 목적함수의 적합도가 높아지도록 PID 제어기를 최적으로 동조한다. 그리고 동조된 PID 제어기 파라미터는 제어시스템에 인가되어 PSO 기반의 PID 제어기를 구성하게 된다.

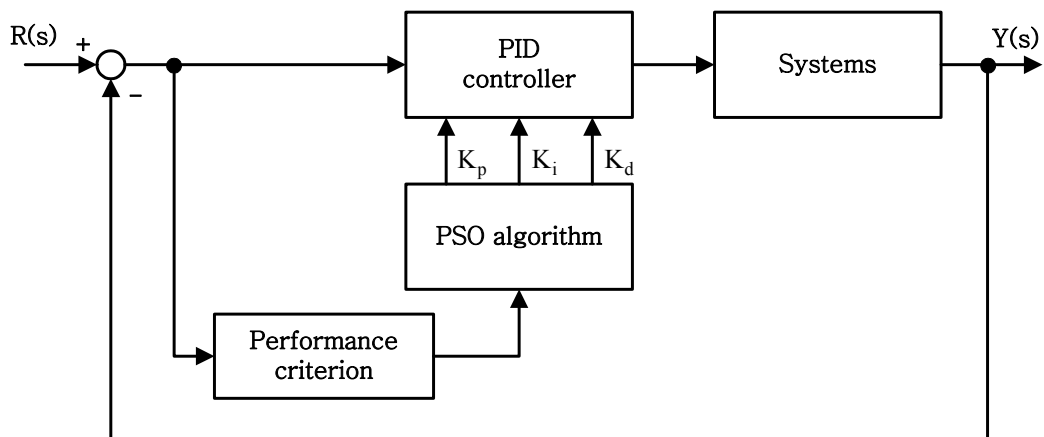


Fig. 3.10 PSO-PID control system

PSO 알고리즘이 동작하는 동안 개체들의 적합도 평가가 이루어지는데, 이때 적용하는 목적함수는 식 (3.11)와 같은 IAE(Integral of Absolute Errors)를 이용한다. IAE는 오차의 절대 크기를 취함으로써 양이나 음의 오차에 균등한 별점을 부여하는 효과를 나타내는 특징을 갖는다.

$$IAE : F = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (3.11)$$

여기서  $t_f$ 는 이 시간 이후의 적분값은 무시할 수 있는 충분히 큰 시간을 의미한다. 각 세대에서 개체의 적합도 값들은 이전 세대의 각 개체의 적합도 값과 비교하여 이전 세대 값보다 좋으면  $P_{best}$ 로 저장되며 전체 집단의  $P_{best}$  중 가장 좋은 적합도 값을 가진 개체는  $G_{best}$ 로 저장된다.

### 3.3.2 PSO 기반 PID 제어기 동조 과정

PSO 알고리즘은 다음과 같은 순서에 따라 최적의 PID 제어기 파라미터를 찾게 된다.

**단계 1.** 탐색 개체의 차원을 초기화한다.

탐색 개체의 차원은 최적화 대상에 따라 결정되며, 본 논문에서는 PID 제어기의 파라미터를 최적화 하는 것이므로 개체의 차원은 3으로 설정된다.

**단계 2.** 초기집단을 형성한다.

집단의 크기는 PSO 알고리즘의 연산속도와 탐색범위에 영향을 준다. 만약 너무 작은 집단의 수를 선정하면 지역해(local solution)에 수렴할 수 있으며 너무 큰 집단의 수를 선정하면 연산시간이 길어지고, 알고리즘 자체에 상당히 큰 복잡성을 인가할 수 있다. PSO는 초기 집단을 탐색 공간에서 행렬형태로 형성하는데 각각의 개체는 PID 제어기 파라미터의 잠정적인 해가 된다. 본 논문처럼 3차원 문제의 경우에는 개체의 위치와 속도는 ‘3×집단의 크기’의 행렬 크기를 갖는다.

**단계 3.** 목적함수의 적합도를 평가한다.

목적함수를 통해 각 개체의 적합도를 계산한다. 본 논문에서는 식 (3.11)과 같은 목적함수를 사용한다.

**단계 4.** 개체의 속도를 업데이트 한다.

$$v_i^{k+1} = w(k)v_i^k + v_i^{chg}$$

$$v_i^{chg} = c_1 \text{rand}() (P_{best\ i}^k - x_i^k) + c_2 \text{rand}() (G_{best\ i}^k - x_i^k)$$

**단계 5.** 개체의 위치를 업데이트 한다.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}$$

**단계 6.** 종료조건

만약 설정한 최대 세대수에 도달하거나 성능지수를 만족하면 종료하고, 그렇지 않으면 **단계 3**으로 돌아간다. 본 논문에서는 최대 세대수에 도달할 경우를 종료조건으로 한다.

## 제 4 장 모의 실험 및 검토

본 장에서는 제안하는 PSO 기반의 PID 제어기의 유효성을 검증하기 위해 시간 지연을 갖는 세 가지 시스템을 대상으로 모의 실험을 실시하도록 한다. 세 가지 시스템에 대한 Z-N의 과도 응답법, C-C법, IMC법, Lopez-ITEA법으로 동조된 기존의 PID 제어기들과 제안된 PSO 기반 PID 제어기의 응답을 비교하였다. 첫 번째 시스템은 FOPTD 시스템에 대해 기존의 동조방법으로 설계된 제어기와 제안된 제어기의 응답을 비교하였고, 두 번째와 세 번째 시스템은 각각 2차와 5차 시스템에 적용하여 응답을 비교하였다.

### 4.1 시스템 I

첫 번째 모의실험에 사용된 모델은 식 (4.1)과 같이 시정수가 5[s]이고, 시간 지연이 1[s]인 FOPTD 시스템이다

$$P(s) = \frac{1}{1+5s} e^{-s} \quad (4.1)$$

본 논문에서 제안하는 PSO 알고리즘을 수행하기 위해 개체 총수(n)=30, 세대수(iteration)=50, 가속상수  $c_1=1.2$ ,  $c_2=1.2$ 로 설정하였다. 관성하중은 식(2.5)에서 설명한 세대수가 증가함에 따라 0.5에서 0.3까지 감소하는 선형감소함수로 설정하였다.

Fig. 4.1은 시스템 I에 대해 PSO가 PID제어기 파라미터를 탐색하는 과정을 보여 주며 40세대 부근에서 최적해를 찾는 것을 알 수 있다.

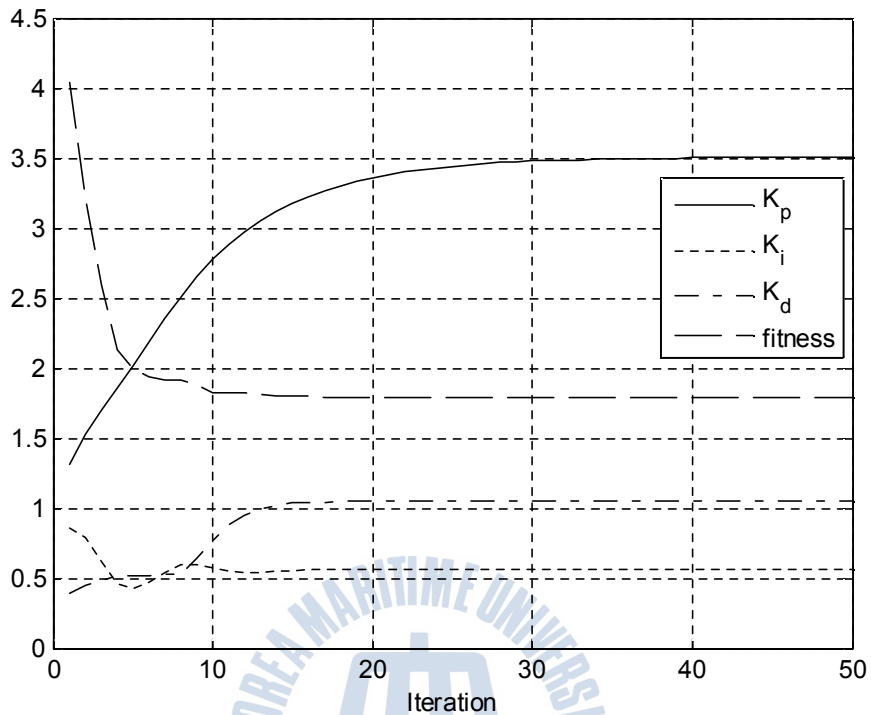


Fig. 4.1 Fitness and PID parameters based on PSO for system I

Table 4.1은 제안된 PSO 기반의 PID 제어기 파라미터와 기존의 방법들로 동조된 파라미터들을 정리한 것이다.

**Table 4.1** Tuned parameters for system I

Tuning Method	Parameters		
	$K_p$	$K_i$	$K_d$
PSO(Proposed)	3.5047	0.5620	1.0556
Z-N	6.0000	3.0000	3.0000
C-C	6.9167	3.0417	2.4269
IMC	4.4000	0.8000	2.0000
Lopez-ITAE	3.7901	0.5607	1.3087

Fig. 4.2는 단위계단입력에 대해 제안된 제어기와 기존 동조방법의 제어기들의 응답을 비교한 것이며, 출력  $y$ 와 입력  $u$ 를 나타내었다. Fig. 4.2에서 보는 바와 같이 제안한 PSO 기반의 PID 제어기가 기존 동조방법의 제어기보다 빠르게 안정화되어 제어성능이 우수한 것을 알 수 있다.

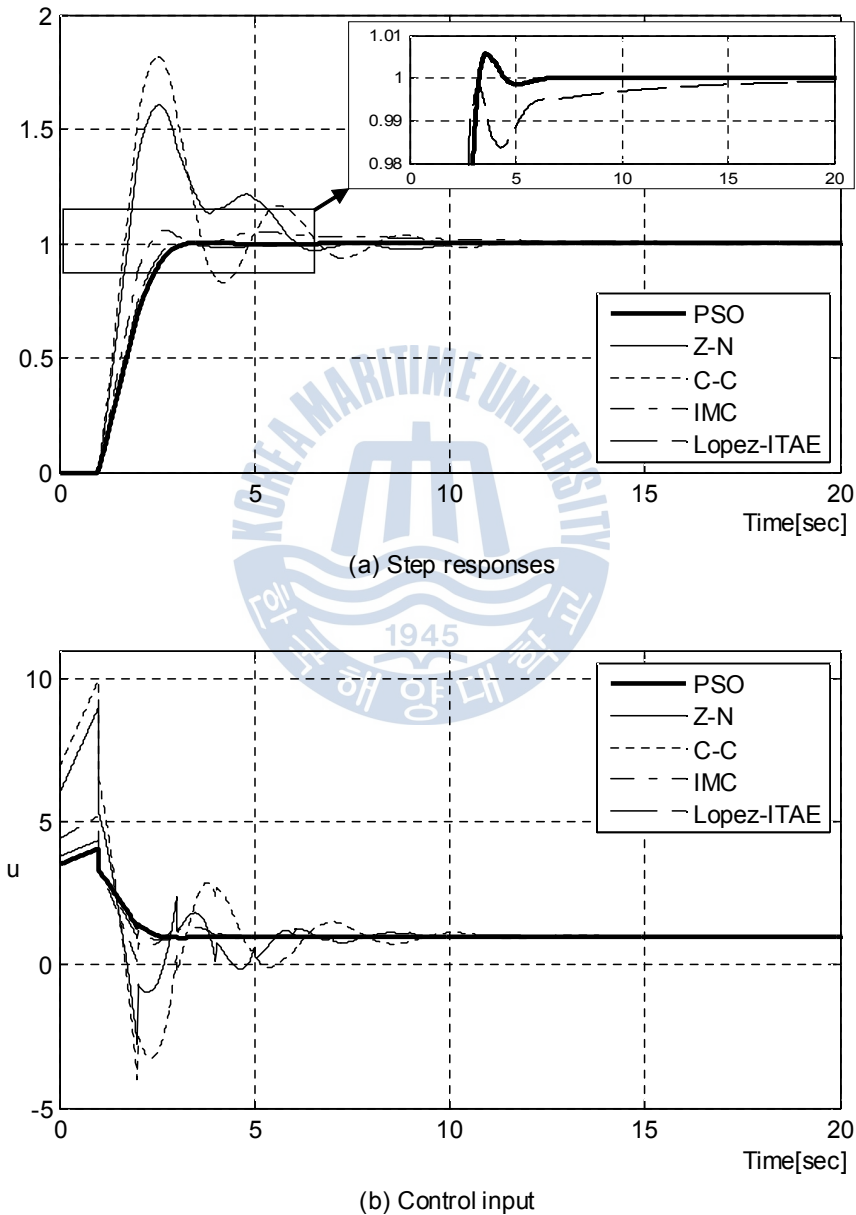


Fig. 4.2 Comparison of set-point tracking responses for System I

각 동조법의 정량적인 응답성능 비교를 위해 퍼센트 오버슈트( $M_p$ ), 피크타임( $t_p$ ), 상승시간( $t_r$ ), 정정시간( $t_s$ )을 Table 4.2에 나타내었다.

**Table 4.2** Performances for system I

Performance	$M_p$ [%]	$t_p$ [s]	$t_r$ [s]	$t_s$ [s]
<b>PSO(Proposed)</b>	0.57	3.61	1.38	2.97
Z-N	60.53	2.55	0.60	9.35
C-C	81.90	<b>1.82</b>	<b>0.54</b>	9.35
IMC	5.94	2.73	0.94	9.83
Lopez-ITAE	<b>0.00</b>	100.00	1.25	<b>2.75</b>

Z-N법과 C-C법은 비슷한 성향을 보이고 있으며 상승시간( $t_r$ )은 제안된 제어기보다 조금 빠르나 퍼센트 오버슈트( $M_p$ )가 크고 정정시간( $t_s$ )이 길다. IMC법은 퍼센트 오버슈트( $M_p$ )는 크지 않으나 그 외 특성은 위의 두 동조법과 크게 차이가 나지 않았다. Lopez-ITAE법은 오버슈트가 없고 정정시간(2%)이 제안한 기법보다 다소 짧았지만 무시할 수 있을 정도로서 성능이 거의 동등함을 확인할 수 있으며, 피크타임( $t_p$ )이 100[s]로 무한대 수렴하는 형태로 목표치에 도달하고 있다. 위에서 비교한 제어 특성과 Table 4.2에서 정리된 바와 같이 제안된 PSO기반의 PID 제어기가 퍼센트 오버슈트가 0.57%로 작고 정정시간이 2.97[s]로 기존 동조법 대비 제어성능이 우수하거나 동등함을 알 수 있다.

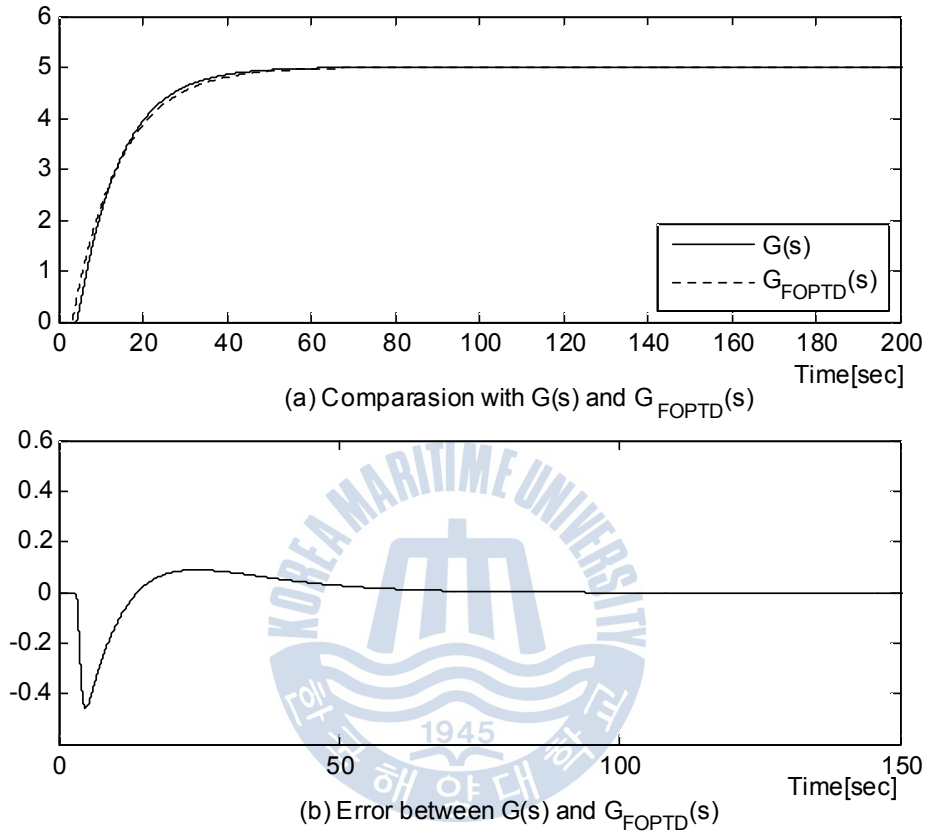
## 4.2 시스템 II

두 번째 모의실험에 사용된 제어 대상은 식 (4.2)과 같이 3[s]의 시간 지연을 갖는 2차 시스템이다

$$P(s) = \frac{1}{(s+0.1)(s+2)} e^{-3s} \quad (4.2)$$

기존의 동조 방법을 적용하기 위해 식 (4.2)를 최소 자승법(least square method)을 이용하여 FOPTD로 근사화하는 작업을 수행하였다. Fig. 4.3은 근사화된 FOPTD의 유효성

을 검증하기 위해 식 (4.2)와 근사화된 FOPTD 시스템을 비교한 것이며, 제어 대상과 FOPTD가 서로 유사한 특성을 갖는 것을 알 수 있다.



**Fig. 4.3** Verification of FOPTD estimation model for system II

최소자승법을 이용하여 근사화된 FOPTD의 상수값은  $K = 5.001$ ,  $\tau = 11.36$ ,  $L = 3.21$ 이다.

PSO 알고리즘을 이용하여 제안한 제어기의 파라미터를 탐색하기 위해 개체 총수 ( $n$ )=40, 세대수(iteration)=50, 가속상수  $c_1=0.12$ ,  $c_2=1.2$ 로 설정하였다. 관성하중은 식(2.5)에서 설명한 세대수가 증가함에 따라 0.9에서 0.4까지 감소하는 선형감소함수로 설정하였다.

Fig. 4.4는 시스템 II에 대한 파라미터 탐색 과정을 보여주며 약 30세대에서 최적해를 찾는 것을 볼 수 있다.



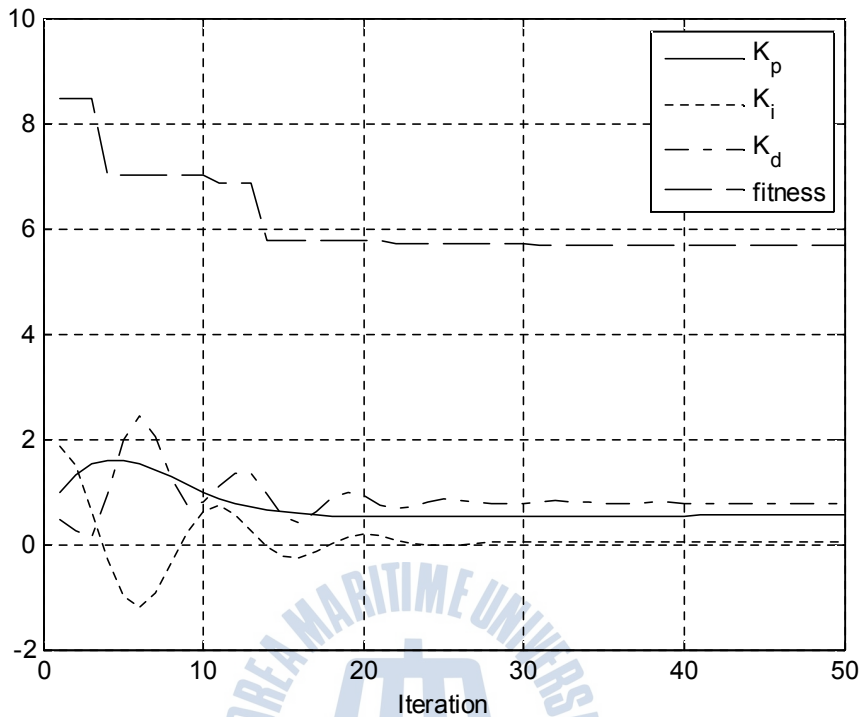


Fig. 4.4 Fitness and PID parameters based on PSO for system II

Table 4.3은 제안된 PSO 기반의 PID 제어기와 기존의 방법들로 동조된 파라미터들을 요약 정리한 것이다.

Table 4.3 Tuned parameters for system II

Tuning Method	Parameters		
	$K_p$	$K_i$	$K_d$
PSO(proposed)	<b>0.5492</b>	<b>0.0368</b>	<b>0.7878</b>
Z-N	0.8488	0.1321	1.3628
C-C	0.9930	0.1401	1.1030
IMC	0.6458	0.0498	0.9086
Lopez-ITAE	0.5647	0.0362	0.6110

Fig. 4.5는 단위 계단 입력에 대한 제안된 제어기와 기존 동조방법의 제어기들의 응답을 비교한 것이며, 출력  $y$ 와 입력  $u$ 를 나타내었다. Fig. 4.5에서 확인할 수 있듯이 제안한 PSO 기반의 PID 제어기가 기존 동조방법의 제어기보다 오버슈트가 가장 작고 정정시간도 가장 빠른 것을 볼 수 있다.

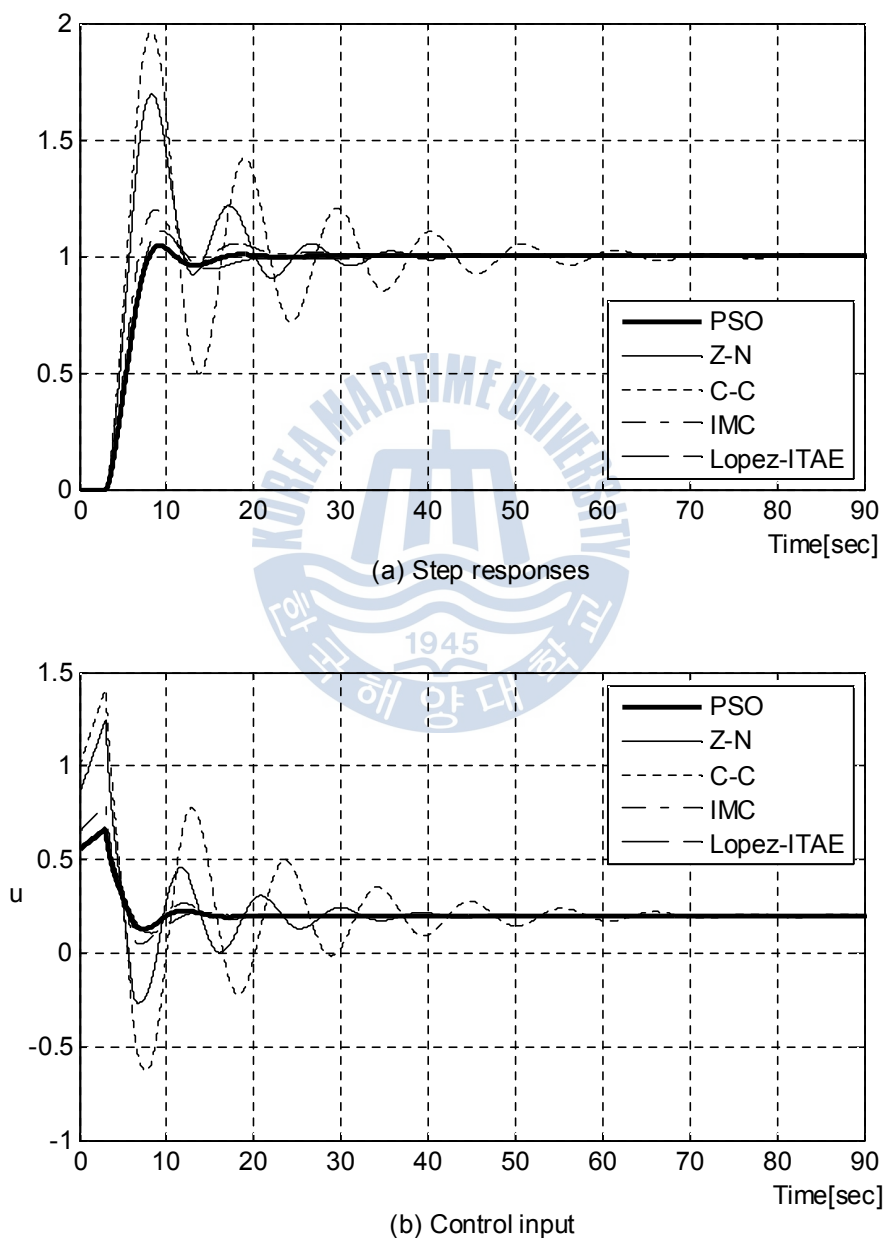


Fig. 4.5 Comparison of set-point tracking responses for system II

Table 4.4는 각 동조법의 정량적인 응답성능 비교를 위해 제안된 PSO 기반의 PID 제어기와 기존의 동조법으로 설계된 제어기들에 대한 제어응답 특성을 정리한 것이다.

**Table 4.4** Performances for system II

Performance	$M_p$ [%]	$t_p$ [s]	$t_r$ [s]	$t_s$ [s]
<b>PSO(proposed)</b>	<b>4.72</b>	9.23	3.39	<b>15.35</b>
Z-N	69.53	8.29	1.93	36.46
C-C	96.17	<b>8.25</b>	<b>1.72</b>	62.84
IMC	20.00	8.77	2.70	21.41
Lopez-ITAE	11.01	9.43	3.24	18.71

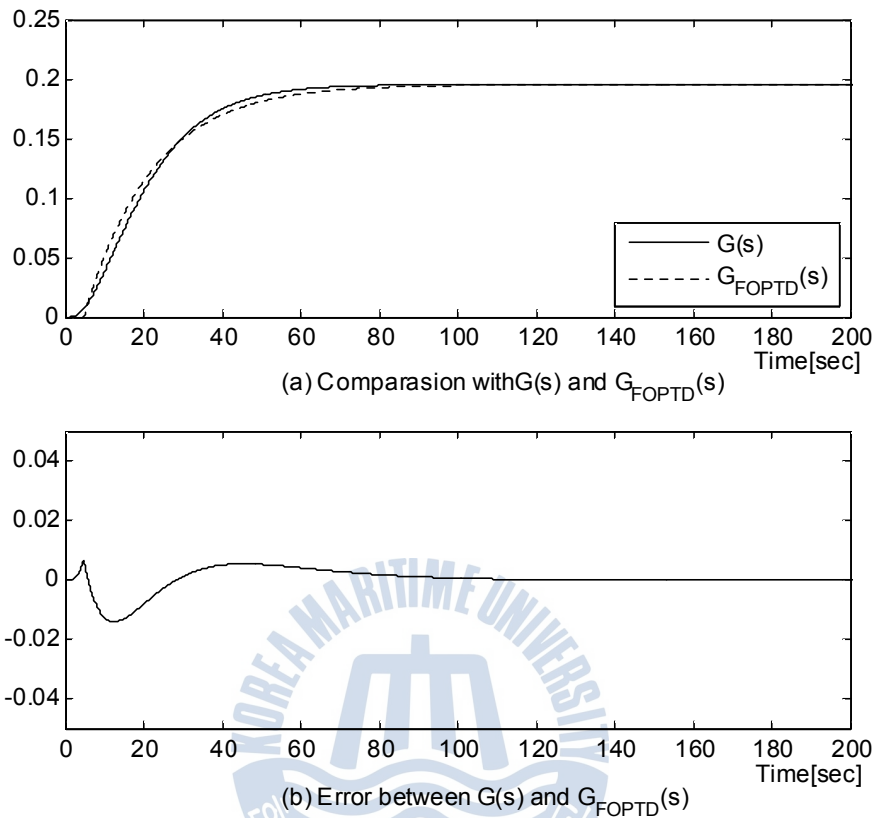
퍼센트 오버슈트( $M_p$ )는 C-C법이 96.17%로 가장 크고, Z-N법, IMC법, Lopez-ITAE법 순으로 나타났으며 제안한 동조기법이 4.72%로 가장 작았다. 상승시간( $t_r$ )의 경우, PSO 동조법이 3.39[s]로 가장 길고, L-ITAE법, IMC법, Z-N법, C-C법 순으로 나타났으나 정정시간( $t_s$ )은 C-C법이 62.84[s]로 가장 길었으며 다음으로 Z-N법, IMC법, Lopez-ITAE법, PSO 동조법 순으로 나타나 제안한 동조법이 가장 빠르게 안정화되는 것을 확인하였다.

### 4.3 시스템 III

세 번째 모의실험의 모델은 식 (4.3)과 같이 시간 지연이 1.5[s]이고, 5차인 고차 시스템이다

$$P(s) = \frac{1}{(s+0.1)^2(s+8)^3} e^{-1.5s} \quad (4.3)$$

기존의 동조 방법을 적용하기 위해 식 (4.3)을 시스템 II와 같이 최소 자승법을 이용하여 FOPTD로 근사화 하는 작업을 수행하였다. Fig. 4.6은 근사화된 FOPTD의 유효성을 검증하기 위해 식 (4.3)과 근사화된 FOPTD 시스템을 비교한 것이며, 제어 대상과 FOPTD가 서로 유사한 특성을 갖는 것을 알 수 있다.



**Fig. 4.6** Verification of FOPTD estimation model for system III

최소자승법을 이용하여 근사화된 FOPTD의 상수값은  $K = 0.1955$ ,  $\tau = 17.43$ ,  $L = 4.74$ 이며, PSO 알고리즘을 이용하여 제안한 제어기의 파라미터를 탐색하기 위해 개체 총수 ( $n$ )=30, 세대수(Iteration)=50, 가속상수  $c_1=0.2$ ,  $c_2=1.2$ 로 설정하였다. 관성하중은 식 (2.5)에서 설명한 세대수가 증가함에 따라 0.9에서 0.4까지 감소하는 선형감소함수로 설정하였다.

Fig. 4.7은 시스템 III에 대한 파라미터 탐색하는 과정을 보여주며 약 45세대에서 최적해를 찾는다.

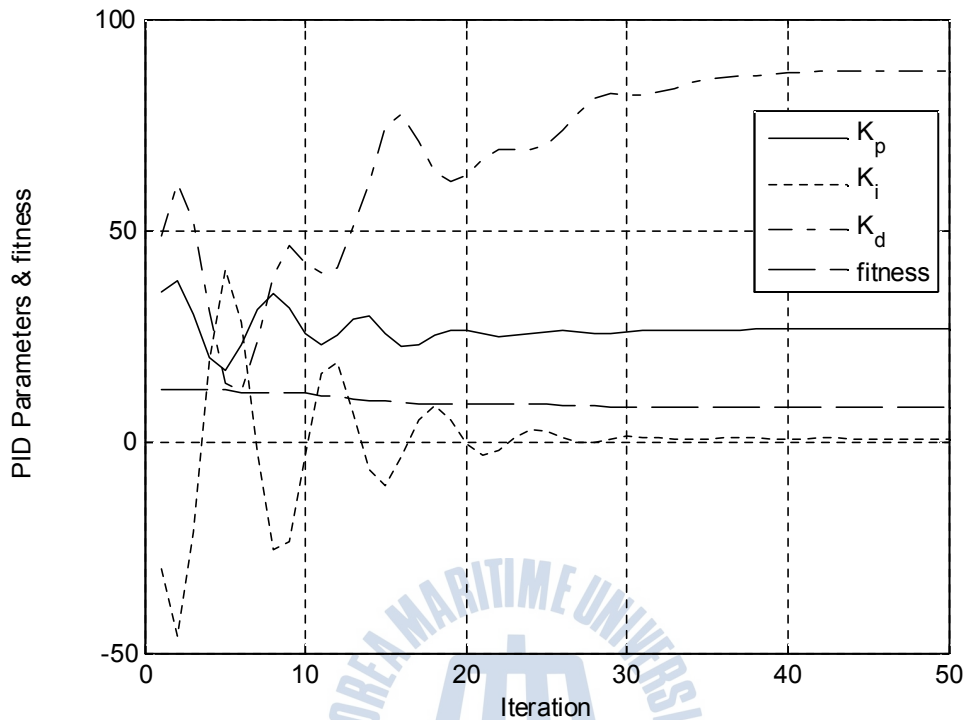


Fig. 4.7 Comparison of set-point tracking responses for system III

Table 4.5은 제안된 PSO 기반의 PID 제어기와 기존의 방법들로 동조된 파라미터들을 정리한 것이다.

Table 4.5 Tuned parameters for system III

Tuning Method	Parameters		
	$K_p$	$K_i$	$K_d$
PSO(proposed)	<b>26.6762</b>	<b>0.7562</b>	<b>87.8628</b>
Z-N	22.5568	2.3776	53.5013
C-C	26.3419	2.5058	43.2970
IMC	17.0839	0.8626	35.6675
Lopez-ITAE	14.9223	0.6241	23.9131

Fig 4.8은 제안된 제어기의 제어성능을 확인하기 위해 단위 계단 입력에 대한 제안된 제어기와 기존 동조방법의 제어기들의 응답을 비교한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 제안한 PSO-PID 제어기가 기존 동조방법의 제어기보다 오버슈트가 작고 정정시간도 빠른 것을 볼 수 있다.

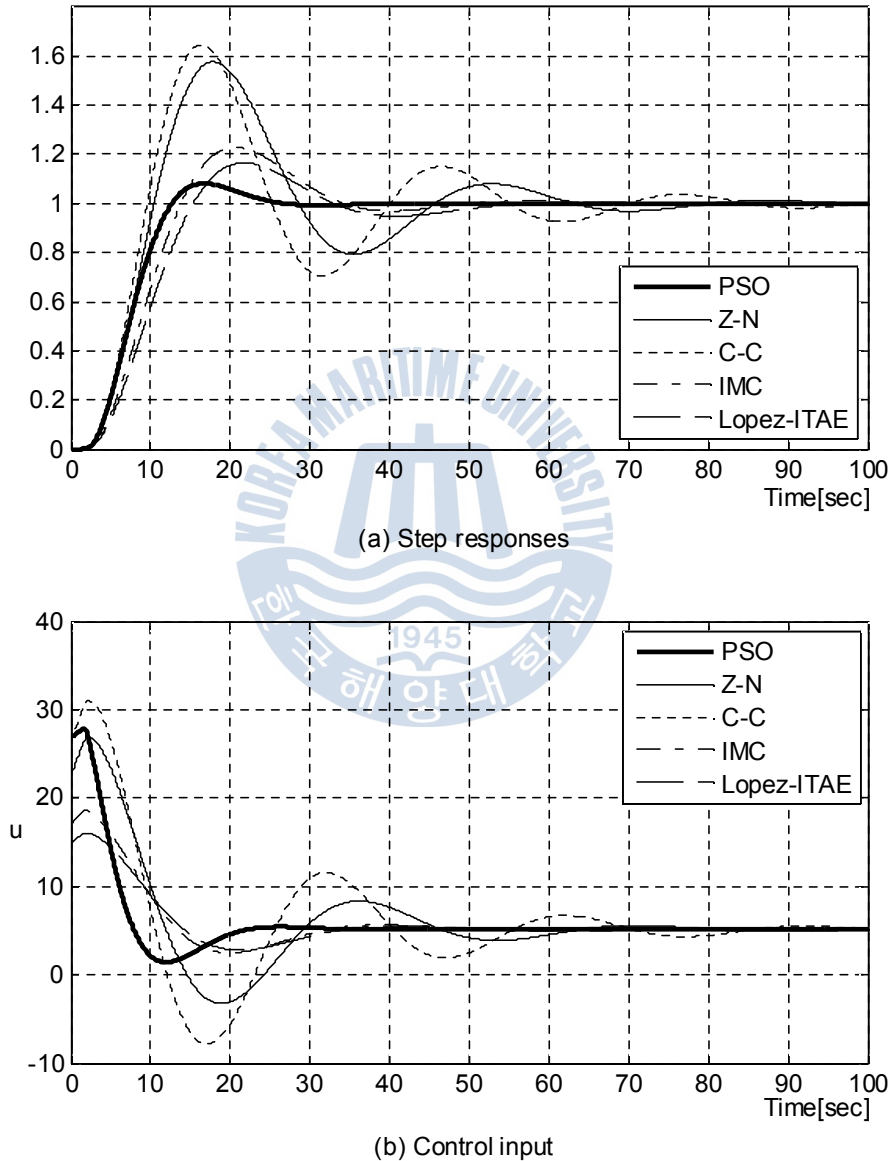


Fig. 4.8 Comparison of set-point tracking responses for system III

Table 4.6은 제안된 PSO 기반의 PID 제어기와 기존의 동조법으로 설계된 제어기들에 대한 제어응답 특성을 정리한 것이다. 시스템 III에 대해 제안된 PSO기반의 PID 제어기의 제어성능이 가장 우수한 것을 확인할 수 있다.

퍼센트 오버슈트( $M_p$ )는 C-C법이 64.55%로 가장 크고, Z-N법, IMC법, Lopez-ITAE법 순으로 나타났으며 제안한 동조기법이 8.15%로 가장 작았다. 상승시간( $t_r$ )의 경우, L-ITAE법이 9.08[s]로 가장 길고, PSO 동조법, IMC법, Z-N법, C-C법 순으로 나타났으나 정정시간( $t_s$ )은 C-C법이 81.65[s]로 가장 길었으며 다음으로 Z-N법, Lopez-ITAE법, IMC법, PSO 동조법 순으로 나타나 제안한 동조법이 가장 빠르게 안정화되는 것을 확인하였다.

**Table 4.6.** Performances for system III

Performance	$M_p$ [%]	$t_p$ [s]	$t_r$ [s]	$t_s$ [s]
PSO(proposed)	<b>8.15</b>	16.81	7.08	<b>23.81</b>
Z-N	57.77	17.89	5.70	75.12
C-C	64.55	<b>16.38</b>	<b>5.11</b>	81.65
IMC	22.89	20.72	8.07	44.96
L-ITAE	16.57	21.82	9.08	50.38

## 제 5 장 결 론

PID 제어기는 구조가 간단할 뿐만 아니라 조정해야하는 파라미터 수가 작고, 현장의 엔지니어에게 친숙하다는 장점 때문에 산업현장 전반에 걸쳐 매우 광범위하게 사용되고 있다. 하지만 현장에서는 최적 성능을 위한 파라미터의 동조 대부분이 엔지니어의 경험에 근거한 시행착오 방법으로 이루어지고 있고, 시스템의 운전환경이 바뀌면 제어기를 재 동조해야하는 번거로움이 있다. 따라서 다양한 시스템에 적용 가능하며 체계적이면서 최적으로 동조할 수 있고, 동시에 우수한 성능을 갖는 파라미터 동조법에 대한 연구가 지속적으로 필요한 실정이다.

본 논문에서는 이에 대한 하나의 방법으로 생명체의 사회적 행동양식을 기반으로 하는 PSO 알고리즘을 이용하여 제어기의 파라미터를 최적으로 동조하는 PSO 기반의 PID 제어기를 제안하였다. 제안한 기법은 PID 제어기의 세 가지 파라미터를 체계적으로 동조하기 위해 IAE를 PSO 목적함수로 사용하였으며 이 목적함수가 최소가 되는 관점에서 PID 제어기의 파라미터를 최적으로 동조하였다. 또한 탐색 초기단계에서는 개체의 전역 탐색을 강화하고 수렴단계에서는 지역 탐색을 강화하기 위해 세대수가 증가할수록 선형으로 감소하는 관성하중을 사용하였다.

제안한 동조법의 유효성을 확인하기 위하여 시간지연을 갖는 1차, 2차 및 5차의 3가지 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 실시하였고, 2차 및 5차 시스템의 경우 기존의 PID 제어기 동조방법과 비교하기 위해 최소자승법을 이용하여 FOPTD로 근사화하는 작업을 수행하였다. 1차 시스템에 대해서는 제안한 PSO 기반의 PID 제어기는 Lopez-ITAE법과 거의 동일한 제어결과를 보였으나 Z-N 동조법, C-C법, IMC법보다는 오버슈트가 작고 정정시간도 빨라 제어성능이 더 우수함을 보여주었다. 그리고 2차 및 5차 시스템에서는 제안한 PSO 기반의 PID 제어기가 오버슈트가 작고 정정시간도 빨라 기존의 PID 제어기 동조방법보다 제어성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

그러나 제안한 방법이 가장 좋은 PID 제어기 동조 방법은 아니기 때문에 오버슈트나 정정시간을 더 감소시킬 수 있는 추가적인 연구는 더 필요할 것으로 사료된다.



## 참 고 문 헌

- [1] 김동화, 이은웅, “PID 제어기 튜닝 기술에 대한 연구현황과 전망”, 전기학회지, 제44권, 제5호, pp. 13-23, 1995.
- [2] A. Visioli, “Tuning of PID Controllers with Fuzzy Logic,” Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Theory Applicant., Vol. 148, No. 1, pp. 1-8, Jan. 2001.
- [3] B. Porter and A. H. Jones, “Genetic Tuning of Digital PID Controllers“, Electronic Letters, Vol. 28, No. 9, pp. 843-844, 1992.
- [4] Chia-Ju Wu, “Genetic Tuning of PID Controllers Using a Neural Network Model: A Seesaw Example“, J. of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 25, pp. 43-59, 1999.
- [5] Ziegler J. G. and Nichols N. B., “Optimum Setting for PID Controllers”, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [6] Cohen G. H. and Coon G. A., “Theoretical Investigation of Retarded Control”, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 75, pp. 827-834, 1953.
- [7] Morari, M. and Zafiriou E., Robust Process Control, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1989.
- [8] A. M. Lopez, C. L. Miller and C. L. Murill, “Tuning Controller with Error-Integral criteria“, Instrumentation Technology, Vol. 14, No. 2, pp. 57-62, 1967.
- [9] J. H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [10] Kennedy & Eberhart, Particle Swarm Optimization, IEEE Inter. Conf. on Neural Network, 1995.
- [11] Latiff, Tsimenidis, Sharif, and Ladha, Dynamic Clustering Using Binary Multi-objective Particle Swarm Optimization for Wireless Sensor Networks, IEEE Inter. Conf., 2008.
- [12] Y. Shi, and R. Eberhart, “A Modified Particle Swarm Optimizer,” IEEE World Congress on Computational Intelligence, Anchorage, Alaska, pp. 69-73, 1998.
- [13] R. Eberhart and J. Kennedy, “A New Optimizer Using Particle Swarm Theory,” Proc. of 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp.

39~43, 1995.

- [14] Wenhua Han, and Ping Yang, “Comparison Study of Serveral Kinds of Inertia Weights for PSO” , Progress in Informatics and Computing (PIC), IEEE International Conf., pp. 280-284, 2010.
- [15] Kim, T.-H., Maruta, I., & Sugie, T., “A Simple and Efficient Constrained Particle Swarm Optimization and Its Application to Engineering Design Problems” , Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science, 224(2), pp. 389-400, 2010.
- [16] S. M. Girirajkumar, Deepark Jayayaj, and Anoop. R. kishan, “PSO Based Tuning of a PID Controller for a High Performance Drilling Machine” , International Journal of Computer Applications(0975-8887), Vol. 1, No. 19, 2010.
- [17] Pillay N., Govender P., Kanny K., “Particle Swarm Optimization of PID Loops for Servo Position Control” , IASTED International Conference on Control and Applications, Vol. 10, pp. 148-153, 2008.
- [18] 강환일, 배환길, 권민우, “입자 군집 최적화 기반 자동 전압 조정기를 위한 PID 설계기법” , 대한전기학회 정보 및 제어 심포지엄 논문집, Vol. 2010, No. 4, pp. 125-126, 2010.
- [19] C. Bohn and D. P. Atherton, “An Analysis Package Comparing PID Anti-Windup Strategies,” IEEE Systems Magazine, Vol. 15, No. 2, pp. 34-40, 1995.
- [20] L. Rundqwist, “Anti-Reset Windup for PID Controllers” , Ph. D. Thesis, Department of Automatic Control, Lund Inst. of Technology, Sweden, 1991.
- [21] A. S. Hodel and C. E. Hall, “Variable-structure PID Control to Prevent Integrator Windup” , IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 48, No. 2, pp. 442-451, 2001.

## 감사의 글

대학교를 졸업한지 10년이 넘게 지난 시점에 다시 학업을 시작한다는 설레임과 함께 일과 병행할 수 있을까하는 두려움이 공존하였습니다. 하지만 대학원 생활은 직장생활에 안주하고 있던 저에게 새로운 배움과 마음가짐을 가지게 하는 소중한 시간이었습니다. 그리고 지난 2년 동안의 석사과정이 어느 덧 조그만 결실을 보게 되었습니다. 그동안 부족한 제게 많은 도움과 격려를 아끼지 않으셨던 분들께 감사의 마음을 전하고자 이 글을 올립니다.

오늘을 맞이하기까지 대학원과 직장 생활을 하는 부족한 저에게 학부생 시절부터 많은 학문적 가르침을 불어넣어 주신 소명옥 지도교수님의 큰 관심과 사랑에 감사드리며 본 논문의 심사를 위해 세심한 검토와 지도로 논문의 깊이를 더해 주신 오세준 교수님, 오진석 교수님에게도 깊은 감사를 드립니다.

바쁜 일정에도 불구하고 늦은 밤을 마다하지 않고 논문 연구를 위해 많은 학문적 조언과 함께 논문 작성에 도움을 준 류기탁 교수님, 이윤희 교수님께 진심으로 감사드리며, 논문 준비에 많은 도움을 준 소건백 후배님, 이주연 후배님을 비롯하여 그동안 많은 관심을 가져 주신 자동제어연구실의 최재준 교수님, 안종갑 선배님, 김경석 선배님, 장하용 교수님, 김종필 교수님, 이승영 후배님, 최우청 후배님, 권석경 후배님, 양아영 후배님, 그리고 대학원 생활에 격려를 아끼지 않은 친구 허재정, 전태열, 정종석에게도 고마운 마음을 전합니다.

대학원 과정을 무사히 마칠 수 있도록 배려해주시고 도와주신 정재순 상무님, 이성호 상무님, 김광대 상무님, 정상원 파트장님, 연료관리파트 동료분을 비롯한 회사 동료분들께도 감사드립니다.

마지막으로 오늘이 있기까지 보살펴 주시며 격려를 아끼지 않으시는 이선애 어머니, 최하순 할머니, 김준용 장인어른, 김정숙 장모님께 제일 깊은 감사를 드리며 많은 격려와 도움을 주신 가족들과 친척들에게 감사드립니다. 특히, 사랑하는 딸 정효원, 무엇보다도 큰 힘이 되어준 가장 사랑하는 아내 김미주에게 고마움을 전합니다. 그리고 지금은 하늘나라에 계신 정용식 아버지께도 감사의 말씀을 드립니다.

여러분들의 가르침과 따뜻한 격려가 있었기에 제가 있었다는 것을 잊지 않고 끊임없이 노력하는 자세로 살아가겠습니다. 감사합니다.

2015년 1월, 정진기 올림